



PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA



PROGETTO DEFINITIVO

EUROLINK S.C.p.A.

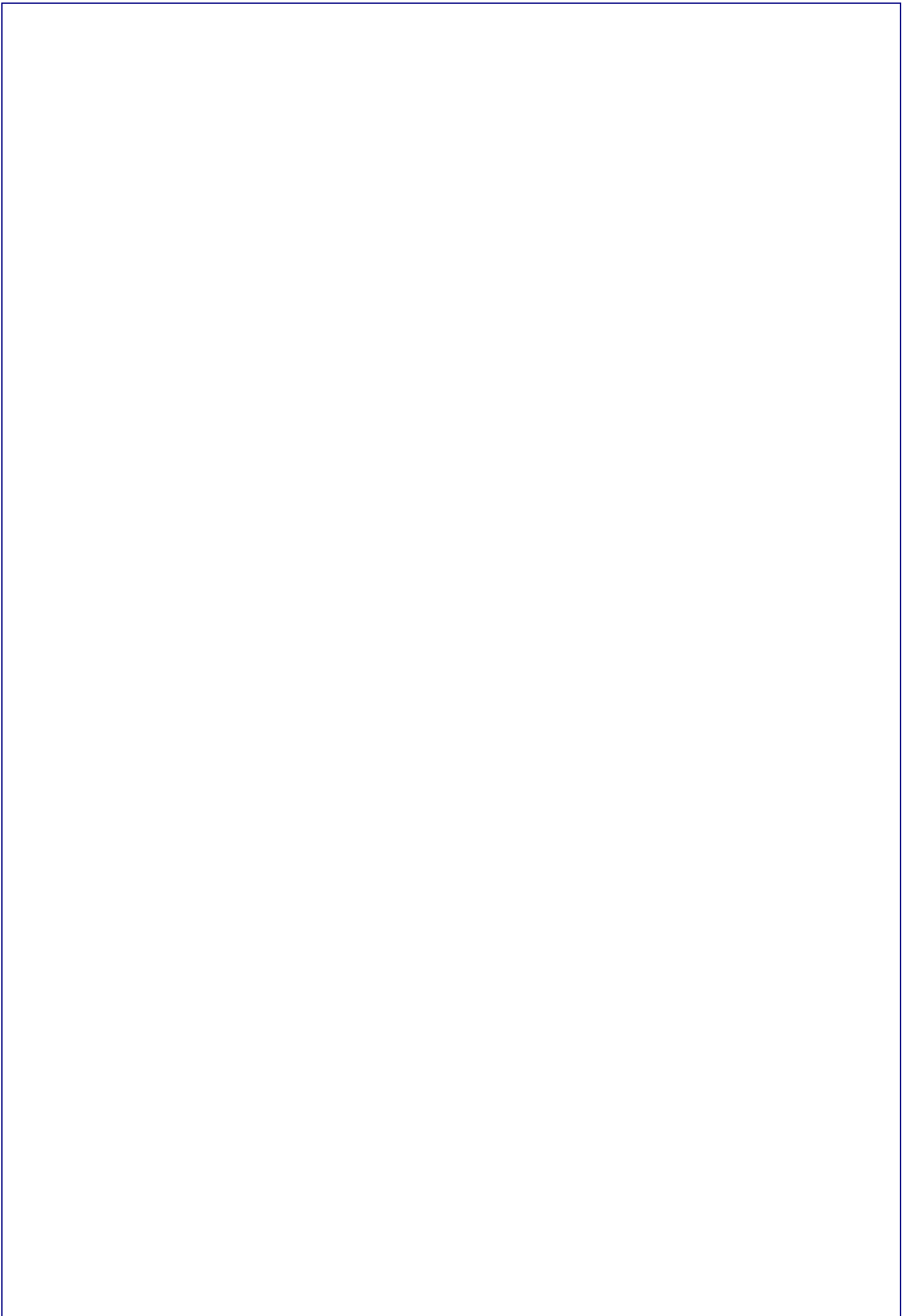
IMPREGILO S.p.A. (MANDATARIA)
SOCIETÀ ITALIANA PER CONDOTTE D'ACQUA S.p.A. (MANDANTE) COOPERATIVA MURATORI E CEMENTISTI - C.M.C. DI RAVENNA SOC. COOP. A.R.L. (MANDANTE) SACYR S.A.U. (MANDANTE) ISHIKAWAJIMA - HARIMA HEAVY INDUSTRIES CO. LTD (MANDANTE) A.C.I. S.C.P.A. - CONSORZIO STABILE (MANDANTE)

<p>IL PROGETTISTA</p>  <p>ROCKSOIL S.p.A. CONSULENZA E ASSISTENZA TECNICA nel campo della GEOTECNICA</p> <p>Dott. Ing. G. Cassani Ordine Ingegneri Milano n° 20997</p>  <p>Dott. Ing. E. Pagani Ordine Ingegneri Milano n° 15408</p>	<p>IL CONTRAENTE GENERALE Project Manager</p> <p>(Ing. P.P. Marcheselli)</p>	<p>STRETTO DI MESSINA Direttore Generale e RUP Validazione</p> <p>(Ing. G. Fiammenghi)</p>	<p>STRETTO DI MESSINA Amministratore Delegato (Dott. P. Ciucci)</p>
--	---	---	--

<p><i>Unità Funzionale</i></p> <p><i>Tipo di sistema</i></p> <p><i>Raggruppamento di opere/attività</i></p> <p><i>Opera - tratto d'opera - parte d'opera</i></p> <p><i>Titolo del documento</i></p>	<p>COLLEGAMENTI VERSANTE SICILIA</p> <p>RILIEVI ACCERTAMENTI E INDAGINI IN CAMPO – INDAGINI AMBIENTALI (STUDI DI SETTORE)</p> <p>ELEMENTI DI CARATTERE GENERALE</p> <p>STUDIO IDROGEOL. E GEOCHIMICO NELL'AREA DEI PANTANI DI GANZIRRI</p> <p>RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; margin-top: 10px;">AS0078_F0</div>
---	--

CODICE	C G 0 8 0 0	A	R X	D	S	I 7	0 0	I R	0 0	0 0	0 0	0 1	F0
--------	-------------	---	-----	---	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	----

REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
FO	20/06/2011	EMISIONE FINALE	PERELLO	PENNINO	CASSANI



		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

INDICE

INDICE.....	3
1 Introduzione.....	5
2 Descrizione delle opere.....	7
3 Modello geologico e idrogeologico.....	11
3.1 Descrizione dei Pantani.....	11
3.2 Assetto geologico.....	13
3.3 Assetto idrogeologico.....	15
3.3.1 Parametri idrogeologici.....	16
3.3.2 Monitoraggio piezometrico.....	18
3.4 Idrologia.....	35
3.5 Modello idrogeologico concettuale.....	36
3.5.1 Considerazioni sulle risorse idriche sfruttate nella zona.....	37
4 Modellizzazione numerica 3D.....	39
4.1 Problematiche progettuali e obiettivi della modellazione numerica.....	39
4.2 Caratteristiche del codice numerico utilizzato.....	40
4.3 Dati di base e metodologia applicata.....	42
4.3.1 Stato naturale della falda.....	43
4.3.2 Metodologia applicata.....	47
4.4 Realizzazione dei modelli di flusso.....	49
4.4.1 Modellazione su dominio ampio.....	49
4.4.1.1 Definizione del dominio ampio.....	49
4.4.1.2 Generazione della <i>mesh</i> (reticolo di elementi finiti).....	49
4.4.1.3 Discretizzazione verticale.....	50
4.4.1.4 Parametrizzazione delle unità idrogeologiche.....	52
4.4.1.5 Condizioni al contorno.....	55
4.4.1.6 Condizioni interne.....	57
4.4.1.7 Calibrazione della piezometria di riferimento e considerazioni sul bilancio idrologico e idrogeologico dei Pantani.....	58
4.4.1.8 Calibrazione delle concentrazioni di salinità.....	65
4.4.2 Modellazione su dominio ristretto.....	69
4.4.2.1 Definizione del dominio ristretto.....	70

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

4.4.2.2	Mesh di calcolo e discretizzazione verticale	71
4.4.2.3	Parametrizzazione delle unità idrogeologiche.....	74
4.4.2.4	Condizioni al contorno.....	76
4.5	Simulazioni previsionali	77
4.5.1	Massima estensione del cono di emungimento nel dominio ampio	77
4.5.2	Corso d'opera: fase di massimo abbattimento piezometrico.....	78
4.5.2.1	Calcolo delle portate di emungimento.....	78
4.5.2.2	Effetti sul bilancio idrico dei Pantani.....	81
4.5.3	Post-operam: fondazioni terminate	91
4.5.4	Considerazioni sull'impatto delle opere sull'intrusione salina.....	94
4.5.5	Considerazioni sugli effetti di marea	106
5	Valutazioni velocità di diffusione di sostanze in falda	113
5.1	Aree di cantiere del viadotto Pantano.....	119
5.2	Area di cantiere dell'opera di ancoraggio	121
5.3	Gallerie ferroviarie e stradali.....	123
5.4	Area di cantiere nell'intorno delle fondazioni delle torri	126
6	Conclusioni	129
6.1	Rapporti tra Pantani e falda.....	129
6.2	Influenza delle opere sulla falda e sugli specchi d'acqua	130
6.3	Influenza delle opere sull'ingressione del cuneo salino.....	132
6.4	Dispersione eventuale di inquinanti e variazioni del chimismo di falda	133
6.5	Sistemi di monitoraggio	134
7	Bibliografia	137

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

1 Introduzione

Nella presente relazione tecnica, facente parte del Progetto Definitivo delle opere ambientali redatto nell'ambito del progetto per la realizzazione del Ponte sullo Stretto di Messina, si approfondiscono i temi relativi allo studio idrogeologico dell'area dei Pantani di Ganzirri, così come richiesto dalla specifica GCG.F.07.02 relativa agli studi di settore.

Lo studio si pone come obiettivo la definizione dello schema di circolazione idrica superficiale e sotterranea dell'area dei Pantani e le modalità di alimentazione di tali specchi d'acqua; si valutano inoltre le eventuali ripercussioni sul sistema naturale esistente a seguito della realizzazione delle opere, con particolare riferimento alle opere di fondazione delle torri del Ponte.

Dopo una descrizione degli interventi finalizzati alla costruzione delle opere, si richiama il quadro geologico-idrogeologico, così come desunto dagli studi di base attraverso l'esame dei dati geologico-idrogeologici esistenti e dei risultati dei rilievi e delle misure di campagna.

Si propone quindi un modello concettuale di funzionamento del sistema idrogeologico dei Pantani di Ganzirri e si riportano gli esiti di simulazioni numeriche 3D volte a ricostruire la situazione ante-operam ed a valutarne le modifiche a seguito della realizzazione delle opere, in termini di eventuale sottrazione di acqua ai Pantani, variazione del cuneo salino e delle caratteristiche chimico-fisiche delle falde, nonché di propagazione di possibili agenti inquinanti.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 30%;"><i>Rev</i></td> <td><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

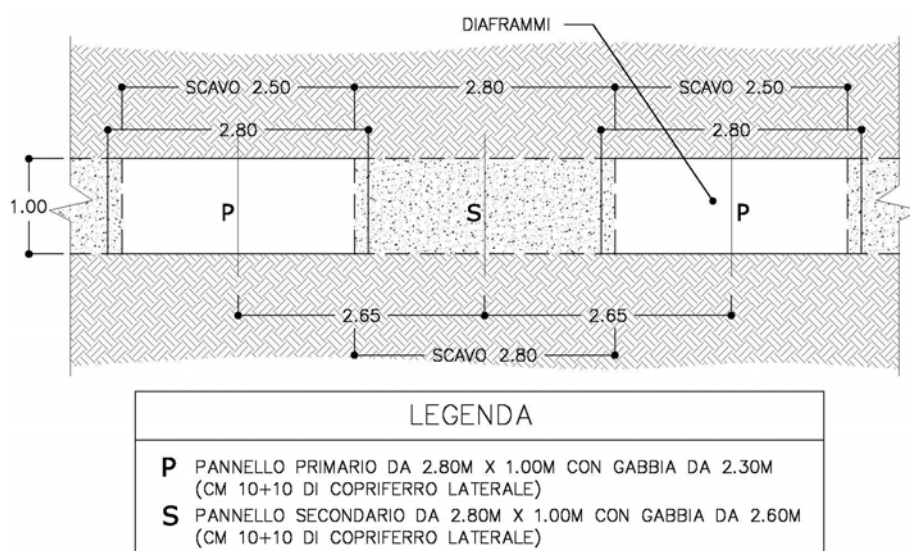
2 Descrizione delle opere

Le opere da eseguirsi nelle vicinanze dell'area dei Pantani di Ganzirri (o Pantano Grande) e Faro (o Pantano Piccolo) sono principalmente le fondazioni della torre lato Sicilia dell'Opera d'Attraversamento e le fondazioni del Viadotto Pantano. L'ancoraggio risulta localizzato a significativa distanza dai Pantani e comunque non interessa la falda.

Le opere di fondazione delle Torri sono costituite da due pozzi circolari, di diametro netto di 55 m, all'interno dei quali vengono realizzati i plinti in c.a. delle torri, collegati trasversalmente da un transetto, di larghezza pari a 18 m.

Per la loro costruzione, dovendo realizzare scavi sotto falda fino a profondità di circa -15 m s.l.m., il progetto prevede interventi atti a minimizzare gli impatti sul contesto idrogeologico esistente, evitando aggotamenti ed operando in condizioni di "idrostatismo".

E' infatti prevista la realizzazione di opere di sostegno degli scavi mediante diaframmi in c.a., dello spessore di 1.0 m, eseguiti con l'impiego di "idrofresa" in grado di determinare la compenetrazione dei diaframmi adiacenti ed ottenere giunti a tenuta idraulica (si veda la figura seguente, dove sono rappresentati i pannelli primari, di sviluppo pari a 2.50 m e quelli secondari, di sviluppo pari a 2.80 m).



L'impiego dell'"idrofresa", quale metodologia realizzativa, consente inoltre di minimizzare gli errori di verticalità, riducendo le tolleranze che possono generare una non perfetta adiacenza dei diaframmi contigui; il sistema perimetrale dei pozzi e del transetto è quindi da considerarsi del tutto

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

impermeabile e costituirà una barriera all'ingresso di acqua nel pozzo durante il suo scavo. Quali elementi di contrasto dei diaframmi si è prevista la realizzazione di travi di cerchiaggio in c.a.; tiranti di contrasto in trefoli saranno posti in opera solo per il tratto del transetto: la perforazione sarà eseguita con " sistema preventer" al fine di evitare venute d'acqua.

Quale elemento di tenuta per il fondo scavo si è invece prevista la realizzazione di un trattamento dei terreni mediante l'impiego di colonne, eseguite con la tecnologia del jet-grouting, con diametro nominale di 1600-1800 mm. Per ottenere tali diametri, in considerazione delle caratteristiche di permeabilità dei terreni oggetto di trattamento, sarà impiegata la tecnologia del "trifluido", nella quale oltre all'immissione nel terreno, ad alta pressione, di miscele cementizie, si prevede anche l'impiego di aria ed acqua quali fluidi di perforazione e con funzione di disgregazione e miscelazione del terreno.

Il trattamento, interessante l'impronta della fondazione (plinto circolare e transetto di collegamento), ovvero disposta internamente al perimetro dei diaframmi in c.a. impiegati per lo scavo delle fondazioni, presenta una duplice funzione: la prima di miglioramento delle caratteristiche di resistenza e di deformabilità dei terreni interessati dallo scarico delle fondazioni dell'opera di attraversamento, con funzione quindi di sottofondazione finalizzata al controllo dei cedimenti ed alla garanzia della capacità portante dei terreni. La seconda, fondamentale per gli aspetti trattati nella presente relazione, volta a garantire la tenuta idraulica del pozzo di fondazione in fase di scavo per la sua realizzazione; in questo caso il trattamento determina la formazione di un tappo di fondo, in grado di garantire l'impermeabilità del fondo scavo. In abbinamento alle opere di sostegno degli scavi, costituite da diaframmi compenetrati a tenuta, mediante impiego di idrofresa, evita l'impiego di attività di aggotamento allo scopo di rendere eseguibili i getti delle opere di fondazione ed evitare impatti sugli equilibri idrogeologici esistenti.

Il trattamento prevede l'adozione di colonne in jet-grouting del diametro 1600 mm, disposte secondo una maglia equilatera di lato 1.20 m. Tale geometria permette un trattamento diffuso dei terreni, ma non offre una compenetrazione ottimale dal punto di vista della tenuta idraulica, soprattutto se si tengono in considerazione le tolleranze di esecuzione, che portano al determinarsi di inevitabili deviazioni di verticalità rispetto all'asse teorico di progetto del trattamento. Pertanto per un tratto terminale del trattamento, alla base del trattamento per uno spessore di 10 m, si è previsto, pur mantenendo la maglia equilatera di lato 1.20m, di aumentare il diametro reso della colonna a 1800 mm. Questo permette di garantire una idonea compenetrazione tra i trattamenti anche in caso di possibili deviazioni sulla verticale, secondo le tolleranze specificate in progetto. In sostanza si procederà ad un'unica perforazione da piano campagna, prevedendo l'impiego di due

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

set di parametri operativi di iniezione (in particolare la velocità di risalita dell'utensile) così da determinare, per un primo tratto a partire dal fondo foro, un diametro reso di 1800 mm e successivamente di 1600 mm.

I trattamenti presentano quindi una geometria costante, con esecuzione della jettiniezione da quota -15.0 m s.l.m. circa a quota -38.5 m s.l.m, impiegando da quota -15 m a quota -28.5 m diametri resi di 1600 mm, e dal quota -28.5 fino a quota -38.5 m s.l.m diametri resi di 1800 mm. Uno schema simile è previsto per l'area di trattamento all'interno del transetto di collegamento tra i due plinti di fondazione. Una specifica maglia di consolidamento verrà adottata in corrispondenza del perimetro dei diaframmi, allo scopo di garantire la tenuta nel punto di infissione delle paratie. Per il dettaglio delle geometrie si rimanda agli elaborati Per il dettaglio delle geometrie si rimanda agli elaborati GCG0800P8DPSTF3TS00000001A "Trattamento dei terreni – Planimetria", GCG0800W8DPSTF3TS00000001A "Trattamento dei terreni – Sezioni" e GCG0800SZDPSTF3TS00000002A "Trattamento dei terreni – Particolari costruttivi". In particolare, in questo ultimo vengono riportati i dettagli costruttivi, con la maglia delle colonne e le quote di esecuzione dei trattamenti.

La quota di esecuzione delle perforazioni per l'esecuzione dei trattamenti risulta a + 2.5 m, ovvero dalla quota di testa dei diaframmi, essendo i trattamenti eseguiti contestualmente alle opere di sostegno. Si prevede pertanto un primo tratto di perforazione a vuoto per raggiungere la quota di inizio trattamento.

Si segnala inoltre la realizzazione di trattamenti dei terreni per una fascia di terreno al contorno dell'impronta delle fondazioni, esternamente all'area delimitata dai diaframmi, con funzione di migliorare le prestazioni dei terreni nei confronti di azioni cicliche di tipo sismico. Presenta quindi una funzione "anti-liquefazione".

Questo trattamento interessa una fascia di terreno al contorno dell'impronta delle fondazioni: verso il mare il trattamento si spinge fino al margine dell'opera di presidio della costa, denominata "passeggiata a mare". La fascia del trattamento, in questa zona, è di circa 25-30 m. Al contorno, in particolare verso l'entroterra, la fascia di trattamento è pari a 35-40 m. Per il trattamento si è prevista l'adozione di una maglia esagonale, di lato 3.00 m, realizzata dall'accostamento di colonne eseguite mediante jet-grouting "trifluido" del diametro di 1800 mm. L'obiettivo è quello di realizzare uno schema cellulare di terreno rinforzato, con proprietà meccaniche di tenuta verso le azioni cicliche tipiche di un evento sismico. I trattamenti colonnari presentano lunghezze costanti, da quota 0.50 m s.l.m a quota -28.0 m s.l.m..

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Per quanto riguarda le opere di fondazione del Viadotto Pantano, si evidenzia che la spalla lato Messina e la fondazione della pila 5 vengono scavate fuori falda senza specifici interventi di consolidamento, prevedendo unicamente diaframmi in c.a. quale opere di sostegno degli scavi.

Per le pile 1-2-3-4 le fondazioni interessano parzialmente la falda raggiungendo al massimo quote di scavo poste a -6.8 m s.l.m., ovvero circa 5-6 m sotto il livello di falda (ubicata a quota 0 m sl.m.). La situazione minima è rappresentata dalla pila 4, dove, in funzione delle quote assolute del terreno, lo scavo avviene 3-4 m sotto la quota di falda.

Anche in questo caso lo scavo viene condotto in condizioni di idrostatico, in quanto il perimetro dello scavo è confinato da diaframmi in c.a. mentre il fondo scavo è impermeabilizzato da un tampone di fondo, dello spessore di 5 m, eseguito mediante colonne compenstrate in jet-grouting sempre di diametro reso 1800 mm disposte a maglia equilatera di lato 1.20 m. Inoltre vi è da considerare la non contemporaneità degli scavi tra le pile del viadotto ed in particolare con la fondazione della Torre. Si ritiene pertanto che la realizzazione delle fondazioni del Viadotto Pantano non rappresenti una criticità nei confronti dei Pantani di Ganzirri, considerati anche i modesti battenti idrostatici rispetto al fondo scavo.

Si valuterà invece attentamente l'impatto che la realizzazione delle fondazioni ha sul flusso delle acque di circolazione sotterranee.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

3 Modello geologico e idrogeologico

3.1 Descrizione dei Pantani

I Pantani di Ganzirri (o Pantano Grande) e Faro (o Pantano Piccolo) sono due specchi d'acqua salmastra, che occupano delle depressioni morfologiche impostate in depositi di prevalente origine alluvionale.

Il Pantano di Ganzirri ha forma allungata con un asse maggiore che misura circa 1670m, larghezza massima di circa 282m e larghezza minima di 94m. La sua profondità è piuttosto modesta e pari al massimo a 7m ca.

Il Pantano di Faro ha una forma sub-circolare con un diametro medio dell'ordine dei 650m; esso è più profondo del precedente, raggiungendo una profondità massima di 31m ca.

Dati sulla loro salinità sono noti da lungo tempo (es. Abbruzzese & Genovese, 1952) e testimoniano di una composizione non molto dissimile da quella dell'acqua di mare, sebbene apporti di acqua dolce dalla falda freatica continentale determinino una certa variabilità. Il Pantano di Ganzirri è quello che presenta salinità inferiore. I dati storici indicano un intervallo di variabilità compreso tra 27 e 35 g/l ca. Per il Pantano di Faro la salinità varia invece tra 29 e 38 g/l ca.

Il Pantano di Ganzirri viene utilizzato da allevamenti di cozze, mentre il Pantano di Faro viene sfruttato da allevamenti di vongole. Negli allevamenti avvengono talora morie di molluschi; ciò vale in particolar modo per il Pantano di Faro ed è da mettersi in relazione con la presenza a circa 11-12 metri di profondità di un livello di acque ricche in anidride solforosa che in periodi di rimescolamento delle acque (periodi particolarmente piovosi) a causa di fenomeni di rimescolamento degassa raggiungendo la superficie.

Il Pantano di Ganzirri è collegato al mare attraverso due canali. Il più grande, a cielo aperto, è noto come canale del Carmine ed ha una larghezza di circa 12m. Il più piccolo è un canale coperto noto come Canale Catuso. Da informazioni orali raccolte in sito risulta che i canali sono aperti in permanenza, pertanto esiste una comunicazione costante con il mare. Gli scambi con il mare hanno direzione variabile, in funzione di diversi fattori, tra cui i più importanti sono le maree, le precipitazioni e le oscillazioni stagionali della falda freatica. Il Pantano di Faro comunica anch'esso con il mare attraverso due canali, di cui uno costantemente aperto al mare e l'altro aperto solo in periodo estivo, poiché durante la stagione invernale risulta interrato e non viene liberato. I due laghi peraltro sono anche in comunicazione tra di loro attraverso un canale noto come Canale degli Inglesi

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

In questo contesto di estrema variabilità è chiaro che la definizione di un bilancio idrologico risulta estremamente difficoltosa, se non impossibile, poiché i livelli nei due laghi variano in maniera diversa nei diversi periodi dell'anno per diversi apporti dalla falda; inoltre anche gli apporti per ruscellamento dai versanti possono modificare repentinamente i deflussi tra il mare e i laghi nonché tra i laghi stessi.

Sull'origine dei Pantani esistono almeno tre ipotesi possibili. Abbruzzese & Genovese (1952) ricollegano la loro formazione a processi sedimentari legati al trasporto indotto dalle forti correnti marine che interessano lo Stretto. Secondo questi autori l'intera piana costiera di Capo Peloro, e le sue propaggini lungo le coste a sud-ovest e ovest, risulta essere costituita da depositi alluvionali trasportati a mare dai torrenti che scendono dai rilievi adiacenti, che sono poi stati presi in carico dalle correnti marine e distribuiti parallelamente alla linea di costa. In sostanza la continua rielaborazione e trasporto dei materiali alluvionali lungo le linee di costa avrebbe progressivamente contribuito a creare delle barre litorali che poi si sarebbero progressivamente accresciute fino a coalescere isolando dei tratti di mare all'interno della terraferma.

Secondo Bottari et al. (2005) tuttavia, almeno per il Pantano di Ganzirri, la precedente ipotesi non sarebbe verosimile perché mancano alcune condizioni tipiche della fenomenologia descritta. Ad esempio: i) non ci sono evidenze di antiche baie (elemento tipico di processi di isolamento progressivo dei rami di mare); ii) non ci sono corsi d'acqua importanti in grado di fornire importanti quantità di depositi alluvionali in breve tempo; iii) la profondità del fondale marino aumenta molto rapidamente allontanandosi dalla linea di costa, ciò che renderebbe improbabile l'accumulo di depositi.

Questi autori propongono invece che almeno il Pantano Grande rappresenti una depressione tettonica bordata a nord-ovest da una scarpata di faglia attiva immergente verso sud-est e a sud est, da una o più faglie antitetiche, immergenti verso nord-ovest. Questo sistema di faglie, aventi tutte movimenti estensionali, avrebbe determinato lo sviluppo della depressione che sarebbe stata solo in parte colmata da depositi alluvionali ed eolico-costieri, lasciando quindi spazio alla formazione di un lago.

Secondo Lentini (presente studio) invece l'origine del Pantano Grande può essere spiegata ipotizzando che la faglia a direzione ENE-WSW presente lungo il suo bordo settentrionale abbia determinato l'abbassamento del blocco meridionale con associato un suo moderato basculamento dal quale avrebbe preso origine, tra la linea di costa e la faglia, una depressione di modesta entità nella quale si sarebbe impostato lo specchio d'acqua. Tale ipotesi è anche quella utilizzata per la realizzazione del modello idrogeologico concettuale utilizzato per sviluppare il modello numerico

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

idrogeologico descritto nel seguito del presente rapporto.

3.2 Assetto geologico

L'assetto litostratigrafico dell'area dei Pantani è piuttosto semplice. La dorsale collinare posta a ridosso degli specchi d'acqua è interamente costituita da depositi riferibili alla *Formazione delle ghiaie e sabbie di Messina*. Si tratta appunto di prevalenti depositi ghiaioso-sabbiosi con ciottoli di dimensioni comprese tra 2 e 30 cm matrice-sostenuti, con sporadiche intercalazioni di sabbie fini e silt sabbiosi. Possono essere presenti livelli conglomeratici cementati di spessore piuttosto modesto (da qualche decimetro a pochi metri) e con scarsa continuità e correlabilità laterale.

Gli stessi depositi, oltre che essere presenti lungo la dorsale sopra citata costituiscono anche il substrato dei depositi della piana costiera. Il loro spessore complessivo nell'area di interesse è piuttosto elevato, anche se variabile lateralmente a causa della presenza di superfici erosionali sia alla base che al tetto. Il sondaggio S12 (1987) attesta che in corrispondenza delle fondazioni delle due torri principali le ghiaie e sabbie si spingono almeno fino alla quota di -200m ca. Il sondaggio S11 (1987) eseguito invece più a nord, in corrispondenza del Pantano di Faro, fornisce indicazioni coerenti con il precedente, indicando che almeno fino alla profondità di circa 180m sono presenti depositi ghiaioso-sabbiosi riferibili sempre alla Formazione delle ghiaie e sabbie di Messina. Si può dunque assumere che profondità dell'ordine dei 200m per la base della Formazione delle ghiaie e sabbie di Messina siano la norma nella zona dei Pantani, anche se, come si dirà più avanti le faglie possono determinare delle variazioni.

Il substrato della Formazione delle ghiaie e sabbie di Messina nell'area dei Pantani, trovandosi a grande profondità, è stato intercettato esclusivamente dal sondaggio S12 (1987). In base alle stratigrafie disponibili esso è costituito da un orizzonte di potenza decametrica di sabbie fini a livelli limoso argillosi, passanti verso il basso a vere e proprie argille verdastre molto addensate e compatte. Tali depositi possono essere attribuiti alla litofacies argillosa della Formazione di San Pier Niceto.

In tutta la piana costiera, tra Mortelle e il Pantano Grande, alla Formazione delle ghiaie e sabbie di Messina si sovrappongono dei depositi alluvionali recenti e attuali e/o depositi di piana litorale a composizione ghiaioso-sabbioso-limosa, inglobanti clasti sub-arrotondati di dimensioni fino a decimetriche supportati da matrice sabbioso-limosa. All'interno di tali depositi si possono rinvenire discontinui livelli di modesto spessore a composizione limosa prevalente. Deposit analoghi ricoprono anche gli alvei dei corsi d'acqua di modesta importanza presenti lungo i rilievi posti a ridosso dei Pantani. Lo spessore di questi depositi lungo la piana costiera è generalmente

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

dell'ordine dei 30-40m.

Dal punto di vista geologico-strutturale gli elementi più importanti nell'area di interesse sono rappresentati da un reticolo di faglie che peraltro hanno anche una considerevole influenza sull'assetto morfologico della regione.

Una faglia principale a direzione ENE-WSW e immersione verso SSE è localizzata immediatamente a nord del Pantano grande e borda la piana costiera separandola dalla base della retrostante dorsale collinare. Questa faglia non affiora in superficie e il suo rigetto è solo ipotizzabile e può ragionevolmente essere dell'ordine di qualche decina di metri. Essa ha accomodato un movimento estensionale causando quindi il sollevamento del blocco settentrionale e un ribassamento e basculamento del blocco meridionale che, come già rimarcato, è verosimilmente all'origine della depressione morfologica in cui si è impostato lo specchio d'acqua.

Una faglia di estensione inferiore, ma probabilmente altrettanto rilevante dal punto di vista del rigetto è presente immediatamente ad ovest del Pantano Piccolo. Essa ha una direzione NNW-SSE e immersione verso WNW. Si tratta, come per la precedente, di una discontinuità a rigetto normale, che separa la piana costiera dal rilievo.

Lungo la costa tirrenica del Capo Peloro è infine presente una terza discontinuità, per la quale però è stata ipotizzata una estensione laterale minore rispetto a entrambe le due strutture precedenti. Essa ha una direzione ENE-WSW e immersione verso NNE antitetica rispetto a quella che borda il Pantano Grande. Anche in questo caso si tratta di una discontinuità a rigetto normale.

Data questa conformazione strutturale la zona del Capo Peloro risulta essere costituita da un alto morfologico-strutturale rappresentato dalla dorsale collinare in sabbie e ghiaie di Messina, la cui origine è legata all'attività da recente dei sistemi di faglie ora citati.

La stratificazione delle ghiaie e sabbie di Messina nel settore meridionale della dorsale del capo immerge a bassissimo angolo (5-15°) verso SSE, mentre nel settore settentrionale l'immersione è ad angolo leggermente maggiore (25-30°) verso NNW. Questa struttura a blanda antiforme, definita dalla stratificazione nelle ghiaie e sabbie di Messina, è presumibilmente da imputare a inflessioni e basculamenti determinati dall'attività recente delle faglie.

La presenza delle faglie sopra descritte implica naturalmente anche la probabile dislocazione della superficie basale della Formazione delle ghiaie e sabbie di Messina e quindi del loro limite con la sottostante facies argillosa della Formazione di San Pier Niceto. Se, come detto in precedenza, in corrispondenza della piana costiera questo limite si attesta a profondità dell'ordine dei 200m o più, sembra invece assai probabile che in corrispondenza della dorsale collinare che rappresenta il blocco non ribassato delle varie faglie, questo contatto si trovi a minor profondità. Il rigetto delle

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

faglie non è noto, tuttavia, ai fini del successivo modello concettuale e numerico idrogeologico è stato assunto un rigetto dell'ordine dei 50m. Pertanto si assume che in corrispondenza della dorsale di rilievi la base delle ghiaie e sabbie di Messina si trovi a circa 150m di profondità.

3.3 Assetto idrogeologico

L'idrostratigrafia nel settore dei Pantani risulta essere relativamente semplice e costituita da un complesso idrogeologico acquifero a permeabilità piuttosto elevata per porosità, poggiante su un complesso acquicludo inferiore a permeabilità da bassa a molto bassa per porosità.

Più in particolare, procedendo dall'alto verso il basso il complesso acquifero risulta caratterizzato come segue.

In posizione più superficiale si trovano gli orizzonti a maggior grado di permeabilità, costituiti dai depositi alluvionali e depositi di piana litorale. La conducibilità idraulica in questi terreni è compresa fra 1×10^{-2} e 1×10^{-4} m/s. Peraltro questi terreni occupano principalmente la piana costiera, mentre sui versanti sono presenti solo localmente e con spessori molto modesti.

Al di sotto inizia la potente successione delle ghiaie e sabbie di Messina che presentano anch'esse una elevata conducibilità idraulica, mediamente compresa tra 1×10^{-3} e 1×10^{-4} m/s, ma che nel settore dei Pantani sembra ridursi sino a valori dell'ordine dell' 1×10^{-5} m/sec (cfr. paragrafo 4.4.1.4 e Figura 7). La presenza di fenomeni di blanda compartimentazione all'interno di questi depositi non può essere esclusa, principalmente a causa di fenomeni di moderata cementazione in alcuni livelli per potenze di ordine metrico, fenomeno che peraltro, negli affioramenti di superficie, si osserva con maggior intensità proprio nel settore dei Pantani (da cui le probabili conducibilità idrauliche minori delle sabbie in questa zona). Tuttavia i livelli a moderata cementazione sono discontinui e non correlabili lateralmente su distanze rilevanti. Pertanto si può escludere con certezza che all'interno della formazione di ghiaie e sabbie di Messina esistano su estensioni significative (ettometriche) importanti falde sospese o comunque corpi acquiferi isolati dal resto del complesso idrogeologico. Pertanto si può ragionevolmente assumere che le ghiaie e sabbie di Messina formino, con i soprastanti depositi di origine alluvionale, un corpo acquifero unitario ove il movimento delle acque avviene secondo flussi intercomunicanti.

Il complesso acquicludo è costituito dal tetto a composizione argillosa prevalente della Formazione di San Pier Niceto, posto perlopiù a profondità piuttosto consistenti e pari mediamente a 150-200m. Questo complesso non è stato caratterizzato direttamente nella zona in esame poiché è stato raggiunto da un solo sondaggio e a profondità elevate. Tuttavia, per analogia con altre zone in cui esso è stato intercettato dai sondaggi si può ipotizzare che esso abbia conducibilità

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

idrauliche dell'ordine di 1×10^{-7} m/s.

Nel quadro idrostratigrafico relativamente semplice delineato in precedenza si inserisce, come elemento di variabilità, l'influenza sulla circolazione idrogeologica delle faglie presenti. Dato lo scarso grado di cementazione e dunque l'assenza di una rilevante coesione all'interno dei depositi ghiaioso-sabbiosi, non si può escludere che le fasce di deformazione associate alle faglie abbiano un ruolo compartimentante sui flussi idrici sotterranei. E' infatti noto che in depositi ghiaioso-sabbiosi i fenomeni di deformazione associati alle faglie determinano sovente fenomeni di compattazione che portano a riduzioni della permeabilità nel loro intorno. Allo stesso modo circolazioni di fluidi sin-tettonici, anche di modesta entità, possono indurre una forte riduzione della porosità efficace (Arch & Maltman, 1990; Knipe, 1992). Le faglie potrebbero dunque agire da elementi acquitardi, in grado di perturbare nel loro intorno lo sviluppo dei sistemi di flusso.

3.3.1 Parametri idrogeologici

Valori di conducibilità idraulica e di trasmissività degli acquiferi sono stati ottenuti mediante prove di emungimento e slug test in pozzi e piezometri accessibili, mentre altri dati sono stati desunti da studi precedenti e confrontati con quelli direttamente acquisiti. Sono stati inoltre considerati i risultati di prove Lefranc eseguite in perforazioni geognostiche per il Progetto Definitivo, con le limitazioni imposte dalla metodologia. Una stima dei valori di trasmissività e di conducibilità idraulica degli acquiferi porosi liberi è stata effettuata utilizzando i dati di portata e di depressione stabilizzata, desunti da prove per la messa in produzione di nuove opere o da monitoraggio in pozzi per uso potabile in produzione continuativa. Dai valori di portata specifica, calcolata in base alla depressione del livello idrico, corrispondente ad un basso valore della portata erogata, si sono ricavate correlazioni con la trasmissività in condizioni di regime stazionario, basate sull'equazione di Thiem e considerando le successive espressioni semplificatrici di Dupuit e di Jacob, come riportato nella letteratura specialistica (Castany, 1967; Custodio e Llamas, 1996).

Si è potuto così ottenere un quadro sufficientemente indicativo dei parametri idrogeologici dei principali acquiferi dell'area considerata.

I valori di trasmissività degli acquiferi alluvionali, ottenuti come sopra specificato, risultano variare tra $3,5 \cdot 10^{-1}$ m²/s e $5,3 \cdot 10^{-2}$ m²/s, dai quali si desumono valori della conducibilità idraulica variabili tra $1,4 \cdot 10^{-2}$ m/s e $2,9 \cdot 10^{-3}$ m/s in relazione alla composizione e allo spessore dei depositi.

Nel caso delle ghiaie e sabbie di Messina i dati disponibili indicano mediamente un valore di trasmissività di $4,2 \cdot 10^{-3}$ m²/s al quale può essere correlato un valore della conducibilità idraulica di $1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Dai dati relativi agli acquiferi alluvionali si evidenzia una certa variabilità tra la zona settentrionale e quella centro-meridionale, imputabile alla litologia prevalente nelle aree di provenienza, all'estensione dei bacini idrografici, alle modalità di deposizione dei materiali ed allo spessore dei livelli produttivi. In linea generale, valori più elevati si hanno mediamente nella zona meridionale dove i depositi si sono formati per l'apporto di corsi d'acqua con bacini idrografici più estesi, nei quali affiorano maggiormente terreni cristallini.

Di seguito si riporta il dettaglio dei parametri di permeabilità K ottenuti dall'analisi dei dati ottenuti dai pozzi e dalle prove eseguite nel corso dei sondaggi, e riportati nei seguenti documenti, Relazione idrogeologica (elaborato CG0800PRGDSSBC6G000000003), Relazione geotecnica generale (elaborato CG0800PRBDSSBC8G000000001).

Litologia	Rel.Idrogeol.+C.Idrogeol. (m/sec)	Rel.Geotecnica (m/sec)	Note
Depositi alluvionali e recenti	$10^{-2} - 10^{-4}$	10^{-4}	Con riferimento ai paragrafi 2.10.8 e 2.10.9 della rel.geotecnica, si è assunto un valore pari a 10^{-4} m/sec (Somerville, 1986) in quanto terreni eterogenei, da prove Lefranc si ha un valore pari a 10^{-6} m/sec; confronta fig. 501 e tabella 39 della rel.geotecnica generale
Depositi di versante	-	10^{-3}	Con riferimento ai paragrafi 2.13.7 e 2.13.8 della rel.geotecnica, non ci sono prove dirette e pertanto si assumono in base alla correlazione Somerville, 1986, in quanto terreni eterogenei, un valore pari a 10^{-3} m/sec
Depositi costieri di spiaggia	-	10^{-4}	Con riferimento ai paragrafi 2.9.8 e 2.9.9 della rel.geotecnica, si è assunto un valore pari a 10^{-4} m/sec (Somerville, 1986) in quanto terreni eterogenei, non si hanno a disposizione prove Lefranc; confronta fig. 326 e tabella 37 della rel.geotecnica generale e figg. 3 e 4 del documento Trattamento dei terreni – relazione tecnica, elaborato CG0800PRGDPSTF3TO00000001.
Ghiaie e sabbie di Messina	$10^{-3} - 10^{-6}$	$10^{-4} - 10^{-6}$	Con riferimento ai paragrafi 2.6.8 e 2.6.9 della rel.geotecnica, si è assunto un valore pari a 10^{-4} (Somerville, 1986) in quanto terreni eterogenei, mentre da prove Lefranc si ha un range pari a $10^{-4} - 10^{-6}$ m/sec; confronta figg. 65, 208, 220, 273, 289, 308 e tabella 4 della rel.geotecnica generale; figg. 12 e 13 del documento Trattamento dei terreni – relazione tecnica, elaborato CG0800PRGDPSTF3TO00000001
Calcareniti di S.Corrado	$10^{-3} - 10^{-7}$	10^{-7}	Con riferimento al paragrafo 2.14 della rel.geotecnica, in assenza di prove Lefranc si è assunto un valore pari a 10^{-7} m/sec
Trubi	$10^{-7} - 10^{-9}$	$10^{-7} - 10^{-9}$	Con riferimento ai paragrafi 2.12.8 e 2.12.9 della rel.geotecnica, si è assunto un range di $10^{-7} - 10^{-9}$ m/sec
Formazione gessoso	a) $10^{-3} - 10^{-8}$	a) $10^{-7} - 10^{-8}$	Con riferimento ai paragrafi 2.8.9 e 2.8.10 della

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;"><i>Rev</i></td> <td style="width: 50%;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

– solfifera: a) calcare brecciato b) gessareniti	b) $10^{-7} - 10^{-9}$	b) 10^{-7}	rel.geotecnica, per la facies calcarea da prove Lefranc si ha un range di $10^{-7} - 10^{-8}$ m/sec, per la facies argillosa le prove edometriche non determinano la K, che viene stimata in base alla correlazione di Rocchi (2003), assumendo un valore medio a 10^{-8} m/sec (cfr. fig. 396); a grande scala l'ammasso risente di eventuali livelli più permeabili (sabbiosi, gessosi, ecc....) e pertanto dalle prove in situ si ottiene un valore medio di K (orizzontale) di 10^{-7} m/sec, confronta figg. 396, 397 e tabelle 27, 32 della rel.geotecnica generale.
Formazione di S. Pier Niceto: c) facies conglomeratici (caratteristiche geotecnica-geomeccaniche simili alla formazione Arenazzo) d) facies argillosa	c) $10^{-3} - 10^{-7}$ d) $10^{-6} - 10^{-7}$	c) $10^{-6} - 10^{-7}$ d) 10^{-7}	Con riferimento ai paragrafi 2.7.9 e 2.7.10 della rel.geotecnica, per la facies conglomeratica da prove Lefranc si ha un range di $10^{-6} - 10^{-7}$ m/sec, per la facies argillosa da n. 2 prove edometriche si è assunto un valore di 10^{-7} m/sec; a grande scala l'ammasso risente di eventuali livelli conglomeratici/arenacei/sabbiosi e pertanto dalle prove in situ si ottiene un valore medio di K (orizzontale) di 10^{-6} m/sec, confronta figg. 338, 359 e tabelle 14, 19 della rel.geotecnica generale.
Metamorfiti	$10^{-6} - 10^{-8}$	$10^{-7} - 10^{-8}$	Con riferimento ai paragrafi 2.11.6 e 2.11.7 della rel.geotecnica, si è assunto un range di $10^{-7} - 10^{-8}$ m/sec.

Fig. 4.1 – Tabella di sintesi dei valori di permeabilità K

E' importante precisare che i valori riportati nella Relazione idrogeologica degli "Studi di Base" (elaborato CG0800PRGDSSBC6G000000003) sono valori stimati in un contesto areale esteso, che media la notevole variabilità all'interno dei depositi, ricorrendo anche a dati di letteratura. Per il Metamorfico, nella Relazione idrogeologica si osserva che non è possibile definire i parametri T e K, in quanto la circolazione idrica sotterranea è determinata essenzialmente dalle discontinuità tettoniche, a parte quella che può aversi nelle coperture di alterazione, di scarso significato ai fini delle valutazioni. Nella relazione geotecnica si sono invece prese in considerazione principalmente le prove eseguite nella campagna geognostica 2010 e nelle indagini pregresse (prove in situ ed in laboratorio).

La carta idrogeologica di sintesi allegata alla presente nota riporta i range dei valori di K associati ad ogni complesso acquifero. I range riportati tengono dei valori estremi ottenuti da tutte le analisi eseguite.

3.3.2 Monitoraggio piezometrico

Nel corso della campagna di indagini eseguita nel periodo aprile – febbraio 2010 sono stati installati una serie di piezometri, a tubo aperto e con celle tipo Casagrande, all'interno delle verticali di sondaggio previste. La strumentazione installata è operativa per il controllo della

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

piezometrica ante-operam e pertanto dell'assetto idrogeologico che verrà incontrato lungo le gallerie autostradali e ferroviarie.

Per quanto riguarda la ricostruzione dei livelli piezometrici attesi in corrispondenza delle opere si è presa come riferimento la carta delle isopieze riportata negli elaborati a cura del Prof. Ferrara. Questa piezometria è stata ricostruita utilizzando i livelli d'acqua registrati nei pozzi censiti (vedi schede censimento) e corrisponde ad un livello nei pozzi, mediato su rilievi eseguiti nei mesi di aprile, maggio e giugno 2010. E' stata successivamente affinata tenendo conto delle letture piezometriche disponibili. Tale riferimento piezometrico è stato utilizzato anche come riferimento di calibrazione nelle simulazioni numeriche di seguito illustrate.

Poiché il dato di calibrazione piezometrico rappresenta un dato essenziale nelle ricostruzioni modellistiche e dal momento che la carta delle isopieze utilizzata mediava dati su tre mesi è stata eseguita un'accurata verifica della sua validità in funzione dei dati piezometrici raccolti da Eurolink nei mesi di ottobre, novembre, dicembre 2010, gennaio e febbraio 2011. Tale verifica aveva il duplice scopo da un lato di valutare se nella zona di interesse le oscillazioni della superficie di falda sono di entità consistente o meno, dall'altro di valutare se i livelli d'acqua indicati dalla ricostruzione della superficie di falda corrispondano o meno a quelli osservati nei piezometri.

Per quanto attiene al primo aspetto (oscillazioni della falda) i dati dei piezometri indicano che le oscillazioni piezometriche non sono particolarmente rilevanti; esse risultano spesso circoscritte nell'ordine del metro, talora dei 2-3m. Se si considera che queste oscillazioni avvengono in genere in piezometri che monitorano zone in cui i gradienti idraulici sono piuttosto elevati, dell'ordine di qualche punto percentuale, possono essere considerate trascurabili ai fini della modellizzazione concettuale e numerica.

Per quanto attiene al secondo aspetto (corrispondenza tra ricostruzione della falda e dati piezometrici), se si tiene conto del fatto che la ricostruzione delle isopieze considera anche il livello piezometrico nei pozzi in un periodo ben specifico dell'anno (aprile – giugno) per il quale non si dispone di letture di livello d'acqua nei piezometri, si osserva, dalle letture dei mesi successivi, una buona corrispondenza, con scarti dell'ordine di qualche metro giustificabili nell'ambito delle normali variazioni stagionali oppure con il fatto che talora i piezometri sono attrezzati con rilevatori tipo Casagrande, che registrano il livello di falda a una profondità specifica ove i carichi dinamici possono differire da quelli medi che si ottengono su una colonna a tubo aperto. Ciò conferma che sostanzialmente la ricostruzione delle isopiezometriche utilizzata per i modelli numerici ed analitici è affidabile e che non sono da attendersi grosse variazioni rispetto allo scenario da essa rappresentato.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Alcune difformità tra la carta delle isopieze ed i dati dei piezometri sono emerse all'estremità occidentale dell'area di interesse (settore dal Km 15+000 al settore 18+000 delle gallerie ferroviarie). In questa zona alcuni piezometri S465, S464 bis restituiscono valori della piezometrica leggermente più bassi rispetto a quelli indicati dalla carta delle isopieze (da circa 3m a 10m). Parimenti i sondaggi S451 ed S453 restituiscono valori decisamente più bassi (circa 30m) rispetto alla isopieza corrispondente. Va detto che tali piezometri sono attrezzati con cella Casagrande installata in potenti livelli limosi non acquiferi, quindi potrebbero non restituire i valori di carico idraulico relativi alla falda. Anche il piezometro S463, a tubo aperto, posto poco ad est dei precedenti restituisce in ogni caso livelli piezometrici inferiori a quelli indicati dalla carta. Tali anomalie dovranno essere oggetto di approfondimento in sede di progettazione esecutiva.

Nel complesso il confronto tra le isopiezometriche riportate sulla Carta idrogeologica, tracciate sulla base delle misure nei pozzi e sulla base delle letture disponibili a novembre 2010 e le ultime letture piezometriche eseguite nel gennaio e febbraio 2011, ha dato un riscontro positivo.

Il controllo effettuato sui singoli piezometri e la isopieza corrispondente, ha evidenziato che solo nei casi sopra riportati, si osserva una differenza rispetto alle isopieze corrispondenti (3-4 piezometri su un totale di 45 installati).

E' importante, a questo proposito, osservare che:

- i piezometri in cui sono state rilevate discordanze importanti rispetto alla isopieza corrispondente, sono entrambi del tipo Casagrande, per i quali è sufficiente un malfunzionamento della cella per ottenere valori non più affidabili; i piezometri tubo aperto in generale forniscono maggiori garanzie di affidabilità nel tempo
- la carta delle isopieze è ricostruita non solo sulla base dei singoli punti d'acqua, ma anche tenendo conto anche delle caratteristiche morfologiche locali, considerando un areale molto esteso.

In sede di Progettazione Esecutiva sarà comunque necessario, anche a valle di un ciclo di letture di durata almeno annuale, procedere alla realizzazione di una carta isopiezometrica di maggior dettaglio, con definizione dei livelli di magra e di morbida. A valle della realizzazione di tale carta dovrà inoltre essere verificata la congruenza delle modellizzazioni numeriche ed analitiche eseguite nella presente fase progettuale, eventualmente attraverso una loro ritaratura, qualora ciò si rendesse necessario.

Di seguito si riportano le letture piezometriche disponibili alla data del 16/02/2011.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Sondaggio	Piezometro	Data installazione	Prof. (m)	Quota terreno m s.l.m.	Livello idrico quota m s.l.m.	Livello falda da p.c.
S407	Tubo aperto	23/09/2010	30	41.019	-	Assente
S409	Casagrande	16/04/2010	30	95.803	-	Assente
S411	Casagrande	30/04/2010	35	94.179	-	Assente
S412	Tubo aperto	21/05/2010	65	118.399	-	Assente
S414bis	Casagrande	29/04/2010	30	141.025	-	Assente
S415	Tubo aperto	01/10/2010	35	126.660	-	Assente
S416	Tubo aperto	17/09/2010	40	128.956	-	Non accessibile
S417	Casagrande	23/04/2010	30	113.178	-	assente
S419	Casagrande	09/09/2010	60	143.611	-	Assente
S420	Casagrande	05/05/2010	65	162.340	-	Assente
S421	Tubo aperto	06/08/2010	80	153.097	-	Assente
S423	Casagrande	05/05/2010	30	81.179	-	Demolito
S425	Casagrande	12/05/2010	50	75.910	-	Demolito
S427	Casagrande	14/05/2010	45	118.171	-	Assente
S428	Casagrande	13/10/2010	102	243.902	-	Assente
S430	Tubo aperto	07/07/2010	39.5	179.573	168.57	-10.79 (gen.2011)
S431	Casagrande	21/04/2010	24	168.085	159.38	-8.90 (gen.2011)
S432	Casagrande	30/06/2010	20	164.104	146.20	-17.98 (gen.2011)
S433	Tubo aperto	26/08/2010	90	215.155	126.99	ass. (gen.2011)
S434	Casagrande	28/06/2010	22	173.019	152.67	-20.58 (gen.2011)
S436	Casagrande	13/05/2010	21	179.452	165.45	-13.97 (gennaio 2011)
S437	Casagrande	03/07/2010	24	165.118	148.30	-16.86 (gen.2011)
S441	Tubo aperto	17/04/2010	42	152.738	147.28	-4.36 (gen.2011)
S445	Casagrande	19/08/2010	50	70.230	-	assente

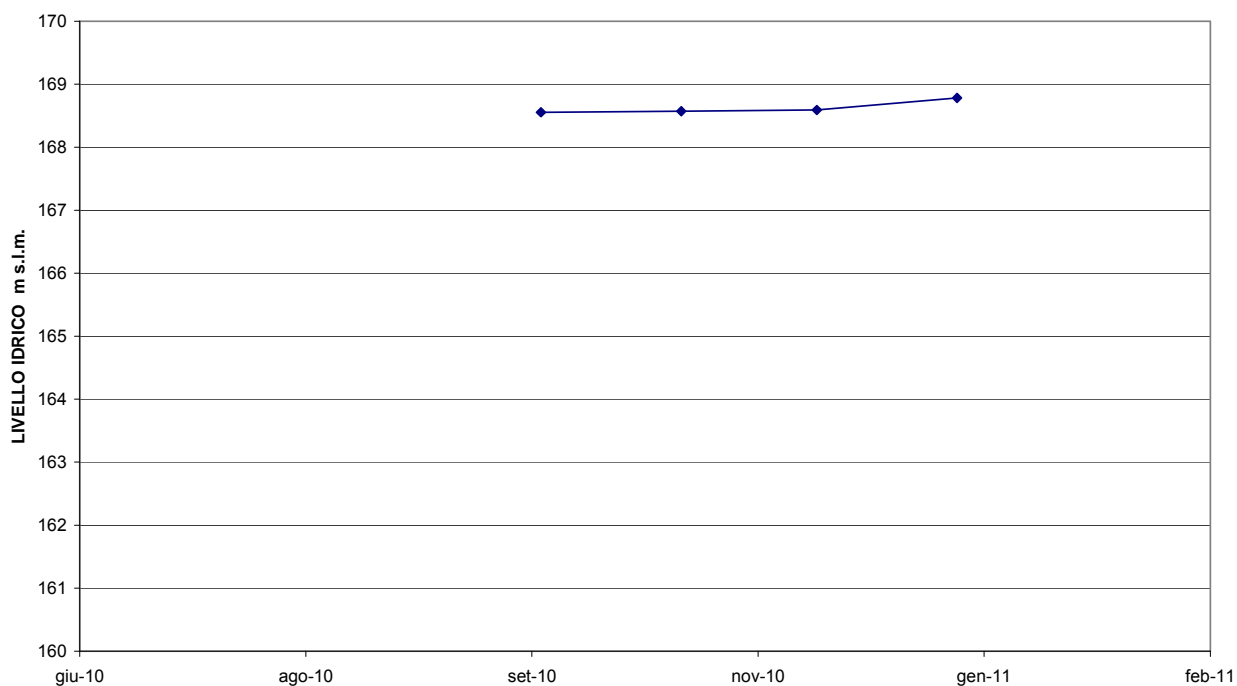
		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO			
		RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

S445bis	Tubo aperto	18/05/2010	50	49.087	0.02	assente
S446	Tubo aperto	14/10/2010	55	87.262	36.97	-52.35
S448	Casagrande	21/04/2010	30	57.586	-	assente
S449	Casagrande	20/04/2010	30	59.021	-	assente
S450	Tubo aperto	25/06/2010	125	122.568	7.79	-115.03 (gen.2011)
S451	Casagrande	20/07/2010	97	90.123	39.19	-51.25
S452bis	Casagrande	05/06/2010	22	71.258	51.01	-20.51
S453	Casagrande	11/06/2010	17	52.968	41.65	-11.20
S454bis	Casagrande	09/06/2010	34	55.660	25.25	-30.53
S455	Tubo aperto	30/06/2010	49	79.852	67.83	-12.03
S456	Casagrande	13/07/2010	49	70.158	64.68	-5.39
S457	Casagrande	16/09/2010	42	51.425	48.68	-3.33
S459	Casagrande	04/08/2010	40	49.705	11.93	-38.31
S459bis	Casagrande	21/07/2010	59	54.481	42.98	-12.08
S460	Tubo aperto	14/09/2010	45	48.278	4.38	-44.01 (gen.2011)
S461	Casagrande	30/07/2010	35	48.596	-	assente
S462	Casagrande	21/07/2010	51	64.251	-	assente
S463	Tubo aperto	10/08/2010	60	57.312	1.58	-55.86
S464bis	Casagrande	27/07/2010	65	64.013	0.72	-63.62
S465	Casagrande	07/09/2010	20	14.291	0.79	-13.90
S466	Tubo aperto	04/10/2010	45	48.600	14.65	-33.97

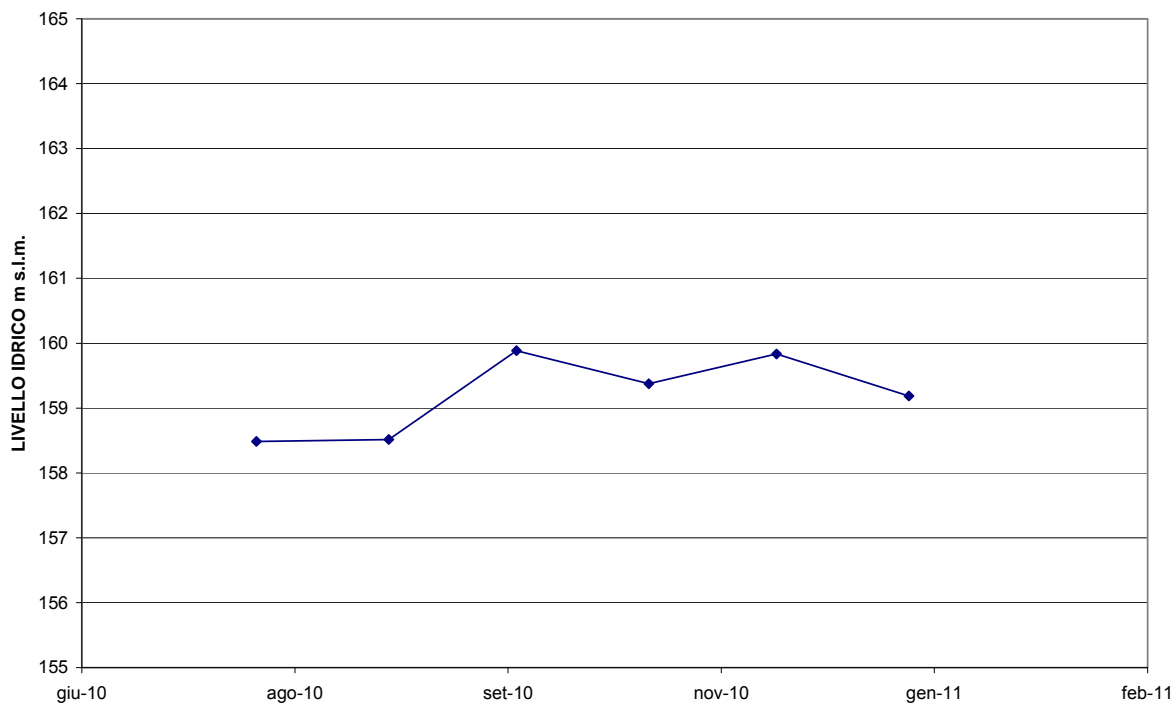
Di seguito si riportano inoltre, i grafici relativi ai singoli piezometri al fine di valutare la variazione della piezometrica nel periodo agosto 2010 – febbraio 2011.

 Stretto di Messina		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Rev</i></th> <th><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

PIEZOMETRO (Tubo aperto) S430

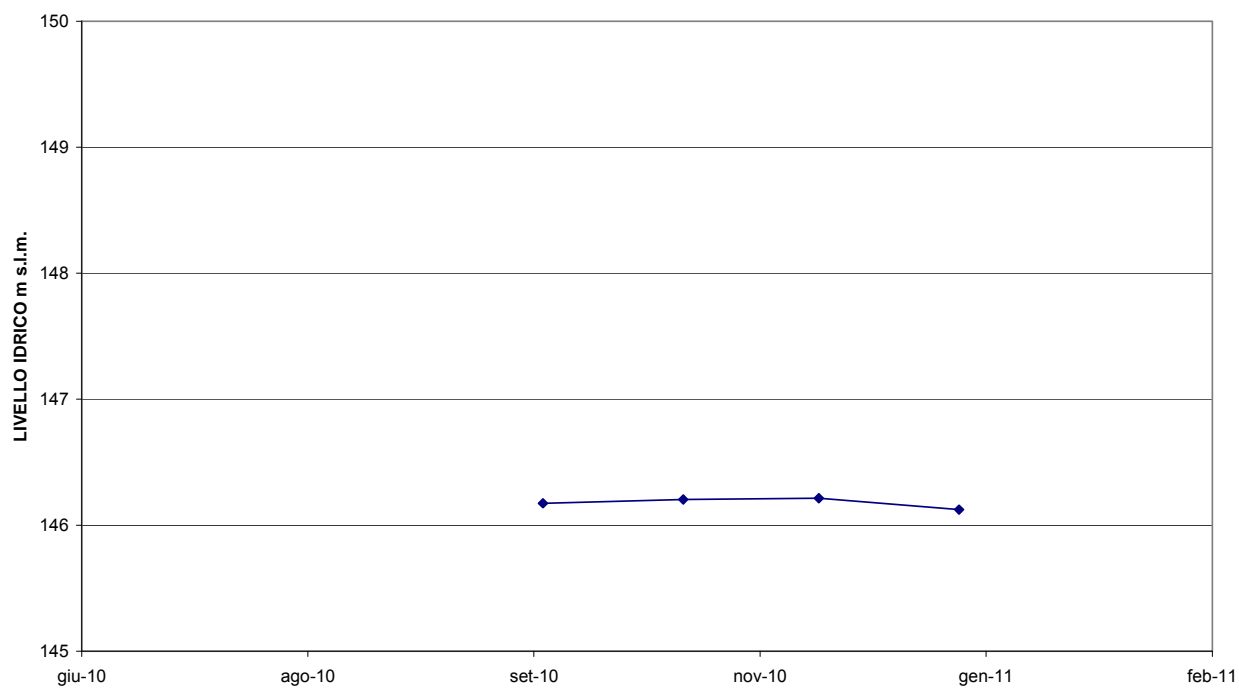


PIEZOMETRO (Casagrande) S431

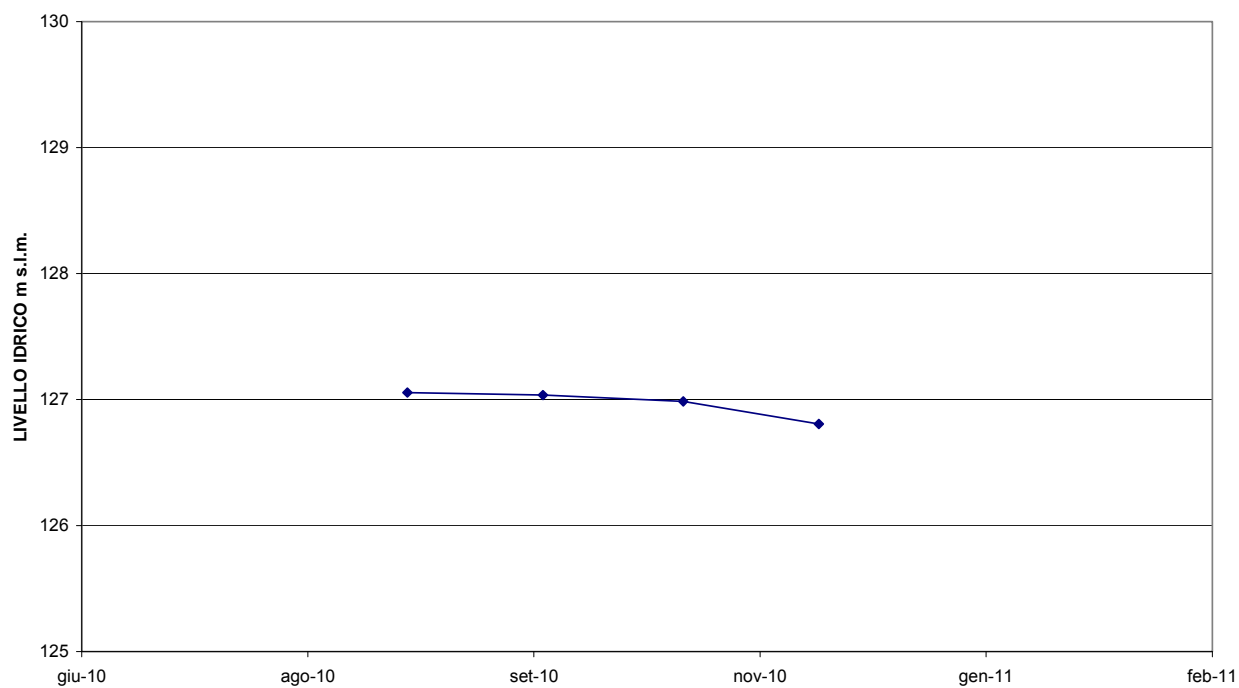


		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

PIEZOMETRO (Casagrande) S432

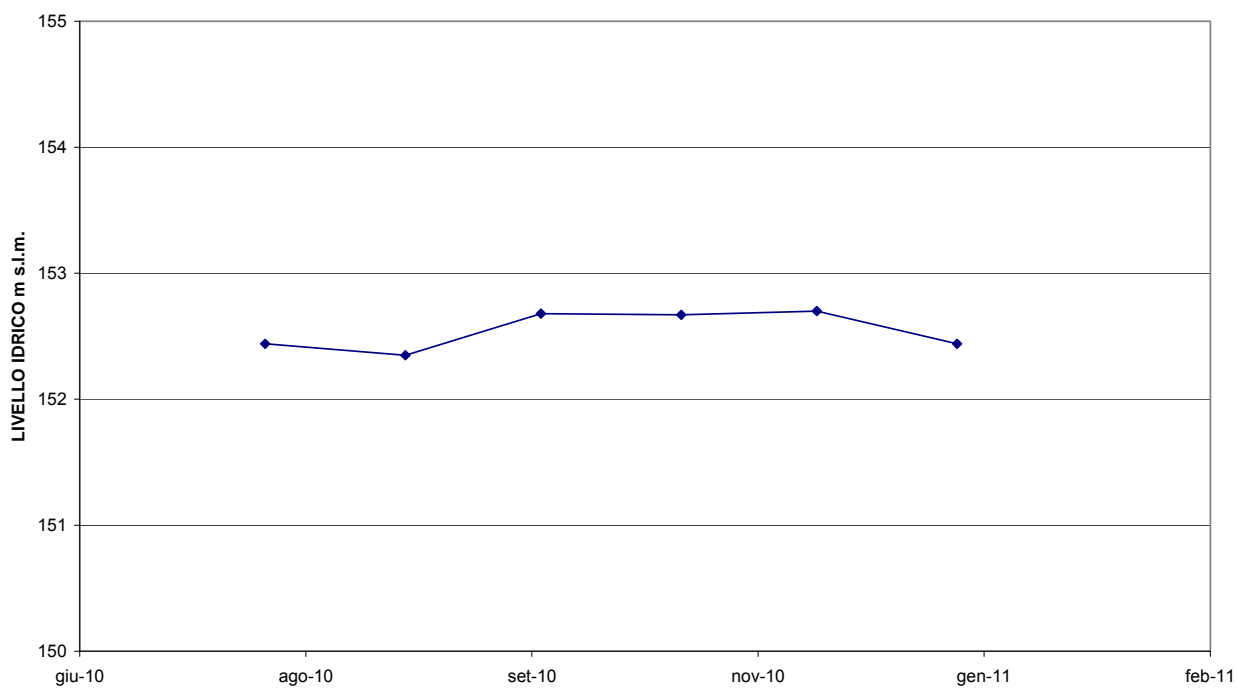


PIEZOMETRO (Tubo aperto) S433

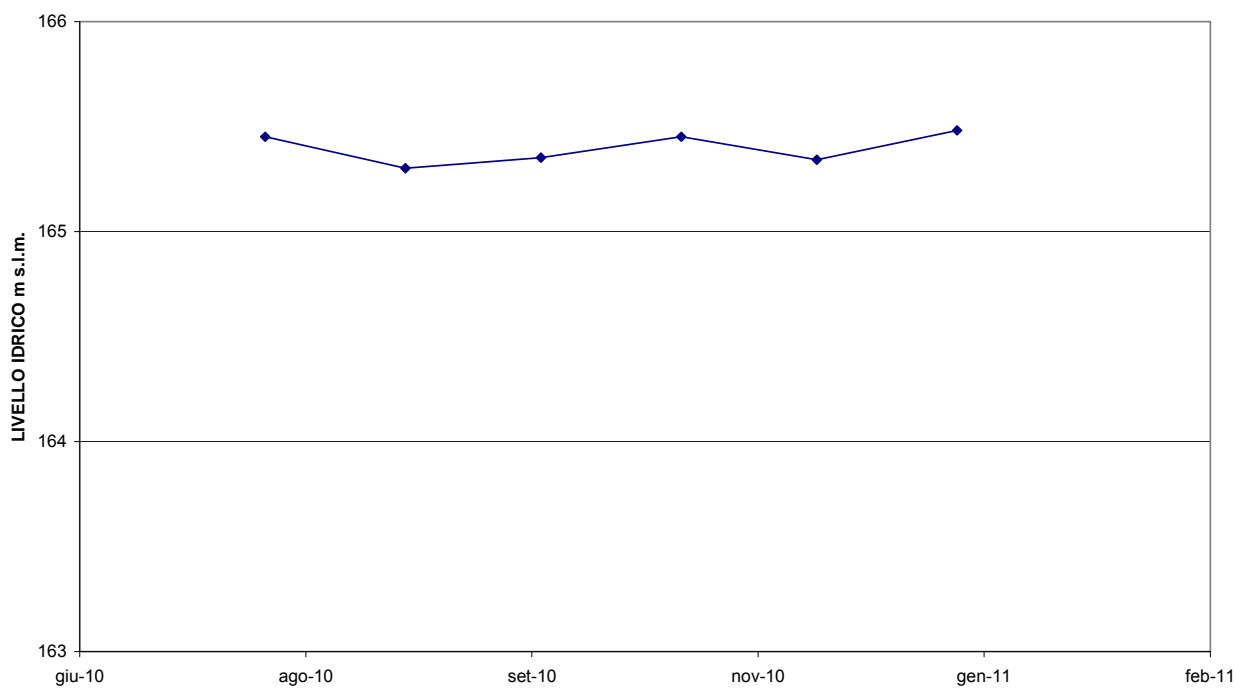


 Stretto di Messina		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Rev</i></th> <th><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

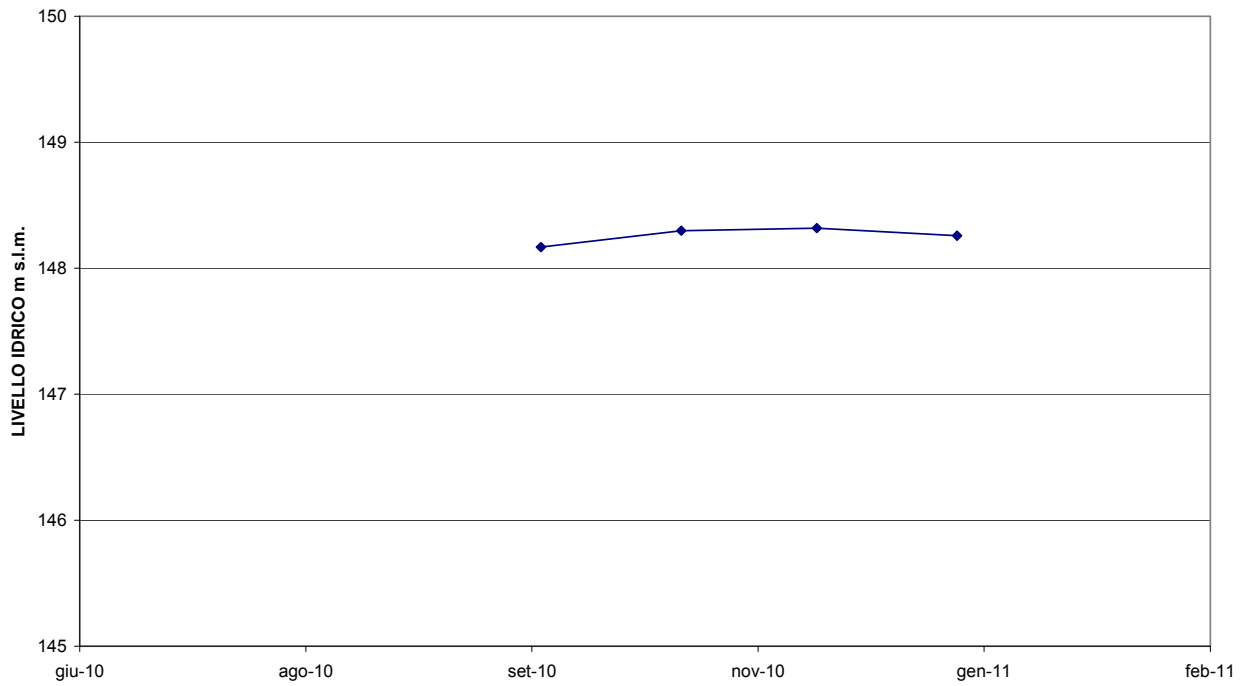
PIEZOMETRO (Casagrande) S434



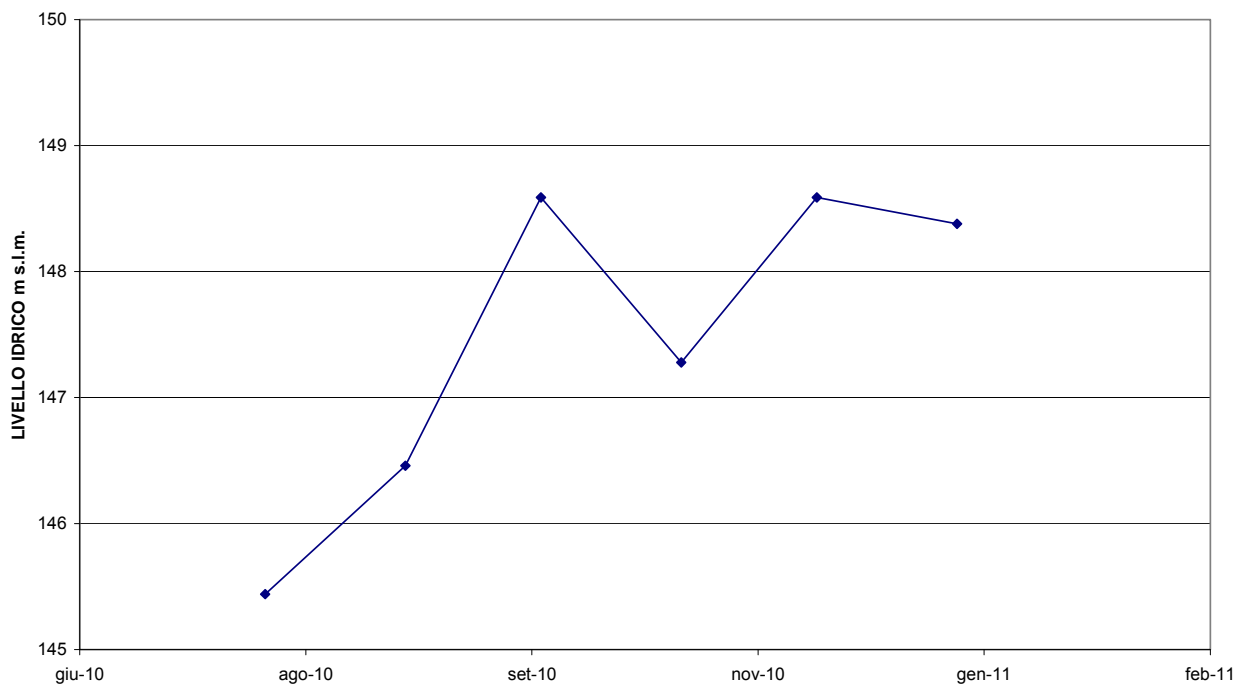
PIEZOMETRO (Casagrande) S436



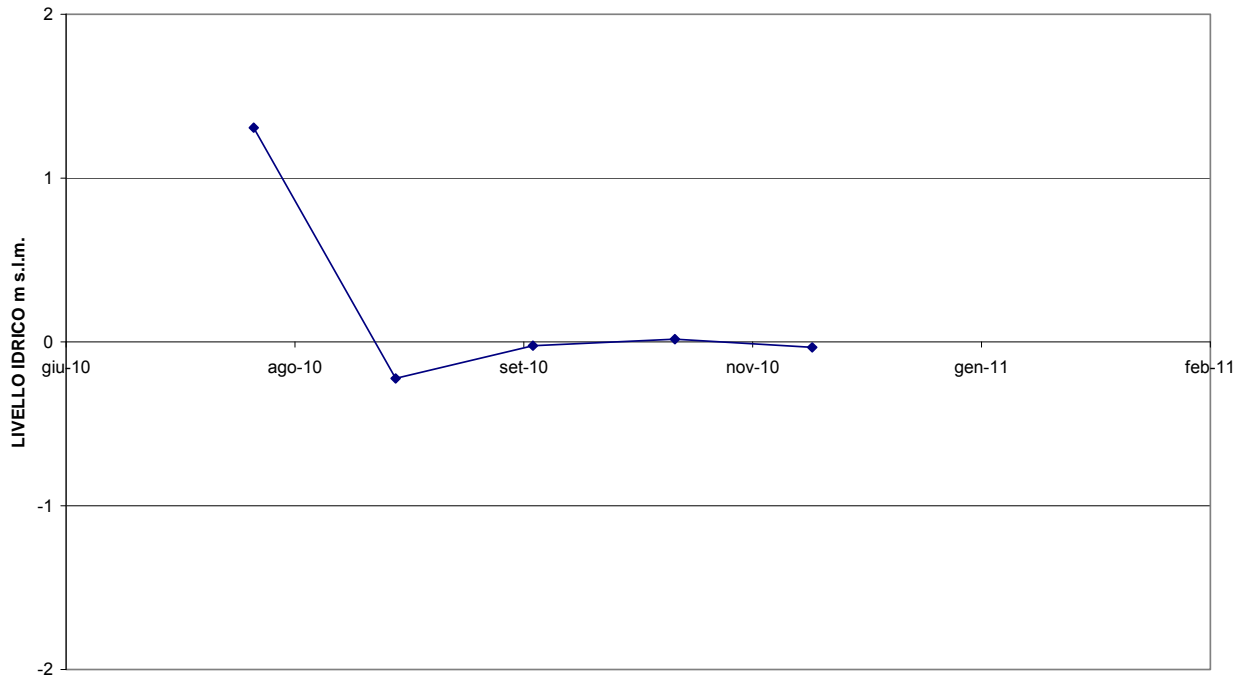
PIEZOMETRO (Casagrande) S437



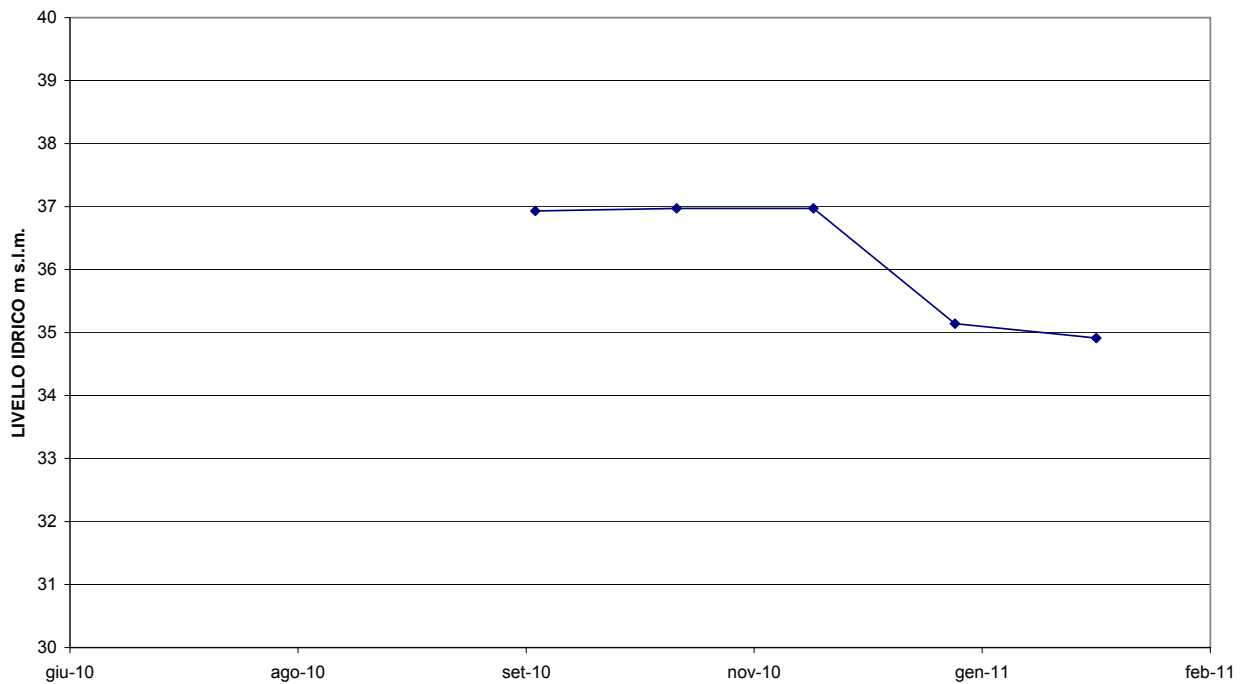
PIEZOMETRO (Tubo aperto) S441



PIEZOMETRO (Tubo aperto) S445bis

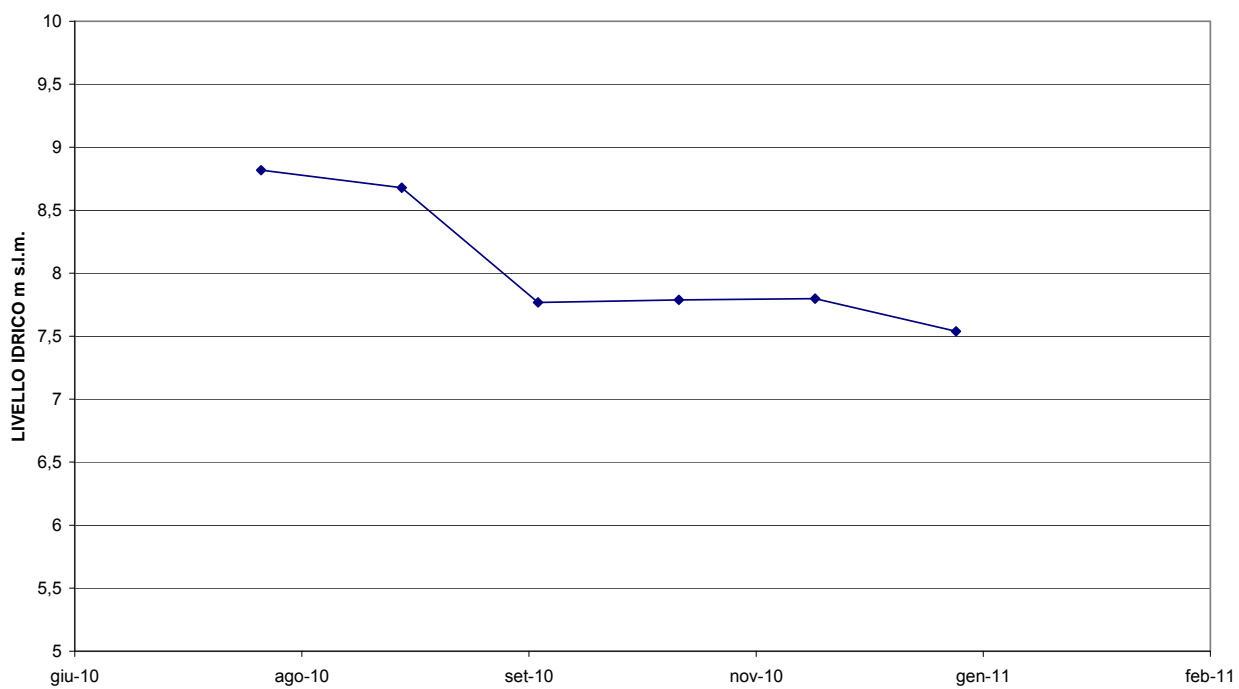


PIEZOMETRO (Tubo aperto) S446

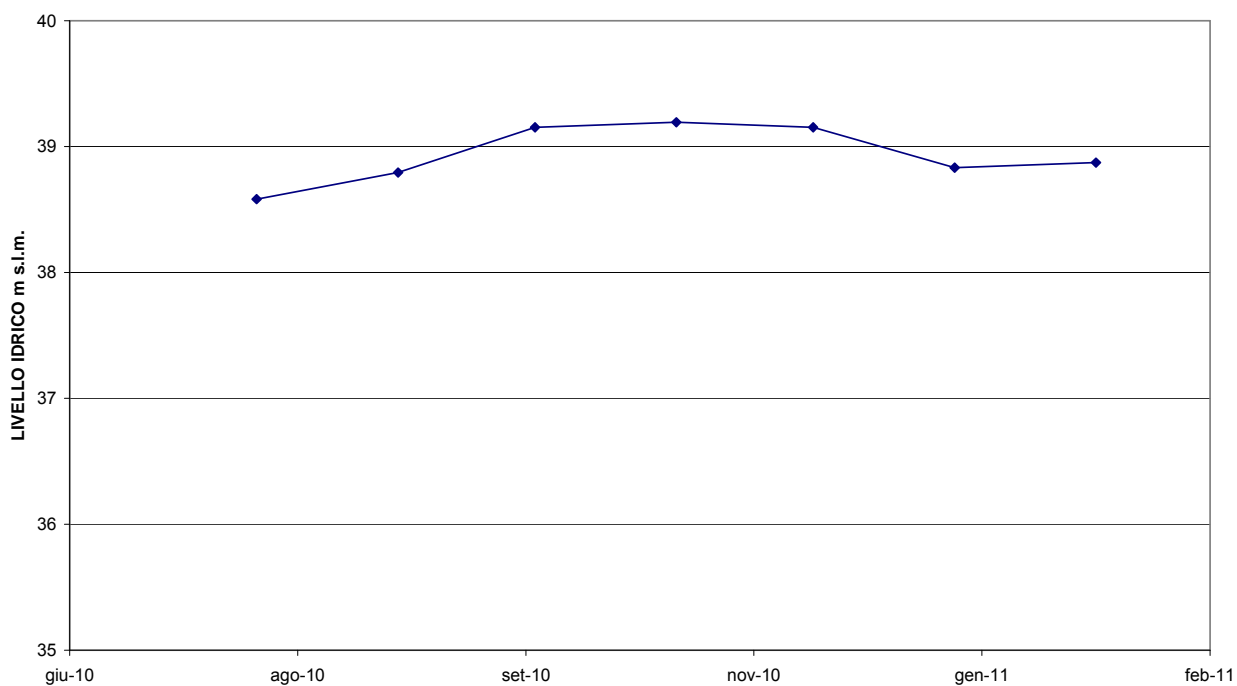


		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

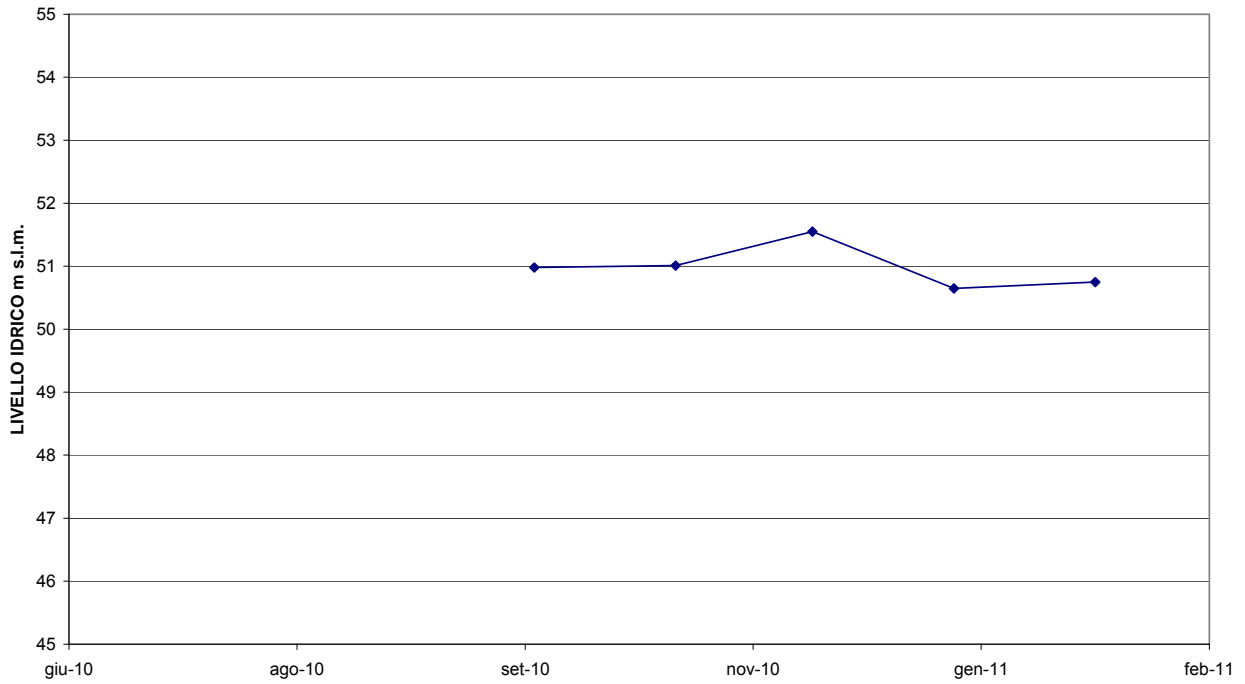
PIEZOMETRO (Tubo aperto) S450



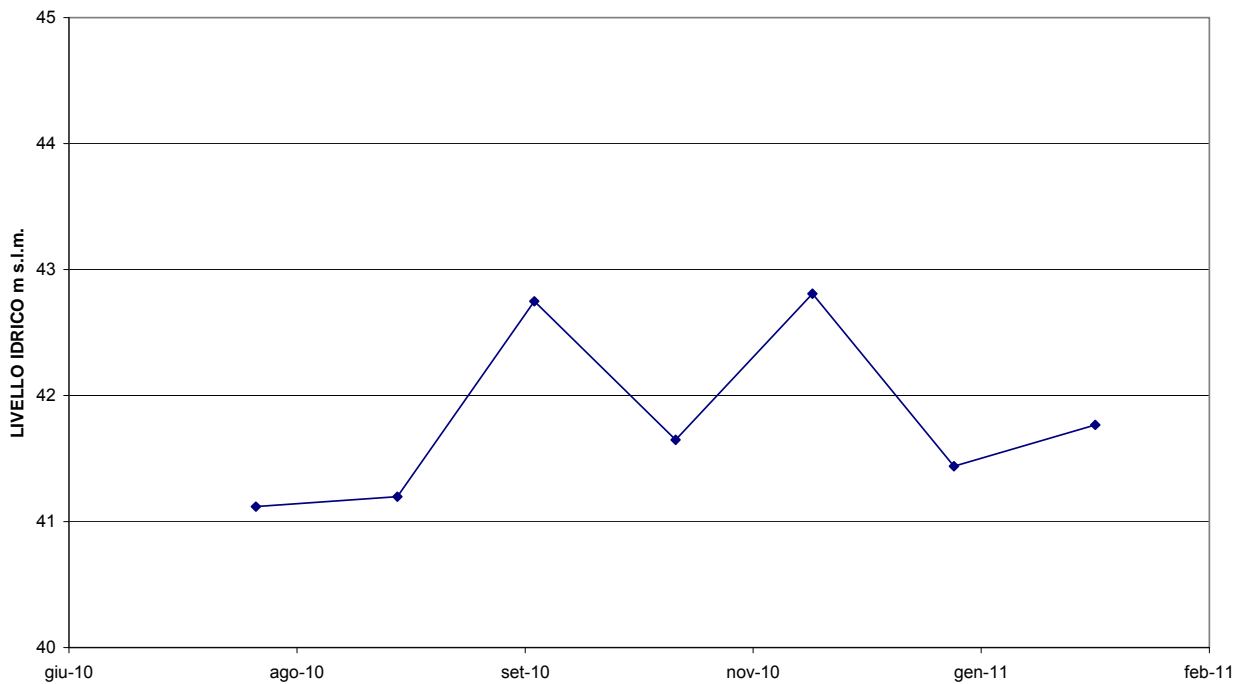
PIEZOMETRO (Casagrande) S451



PIEZOMETRO (Casagrande) S452bis

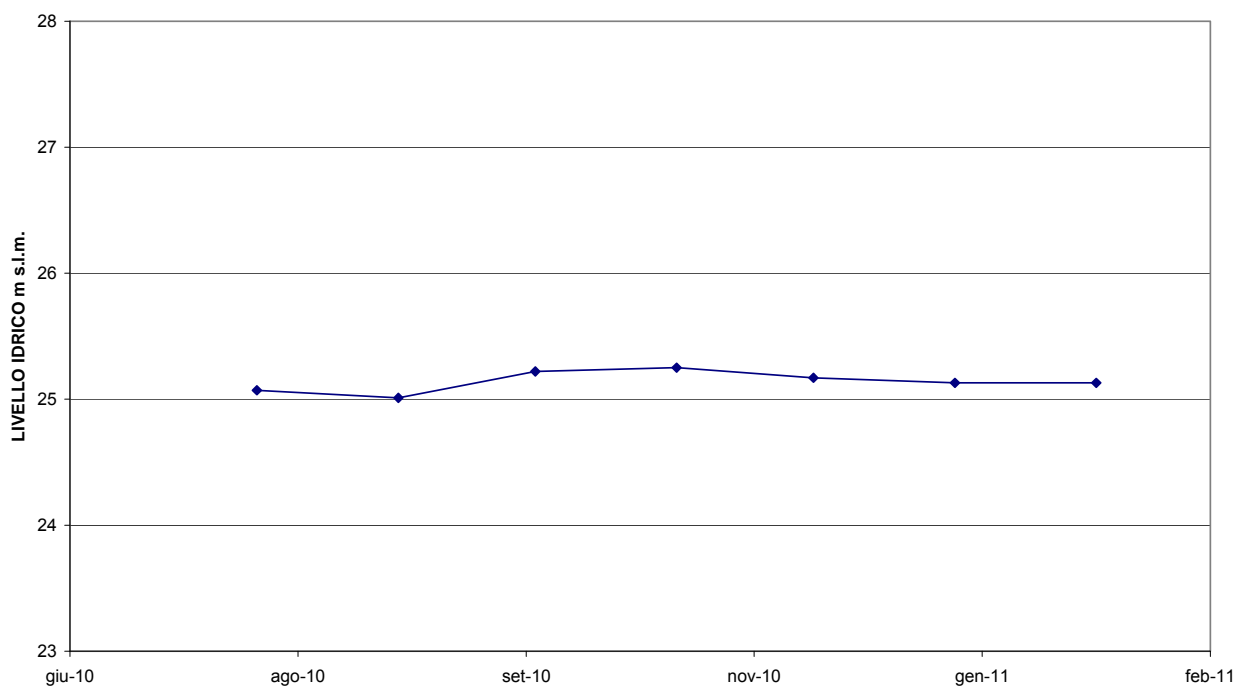


PIEZOMETRO (Casagrande) S453

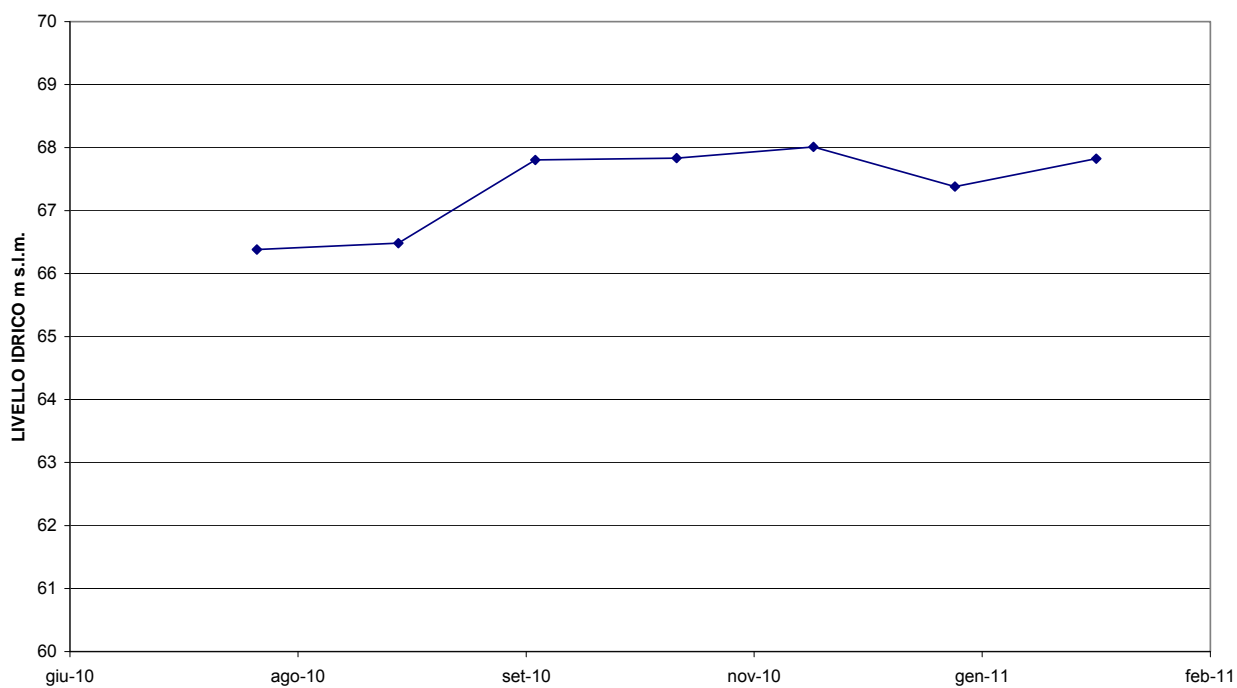


		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Rev</i></th> <th><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

PIEZOMETRO (Casagrande) S454bis

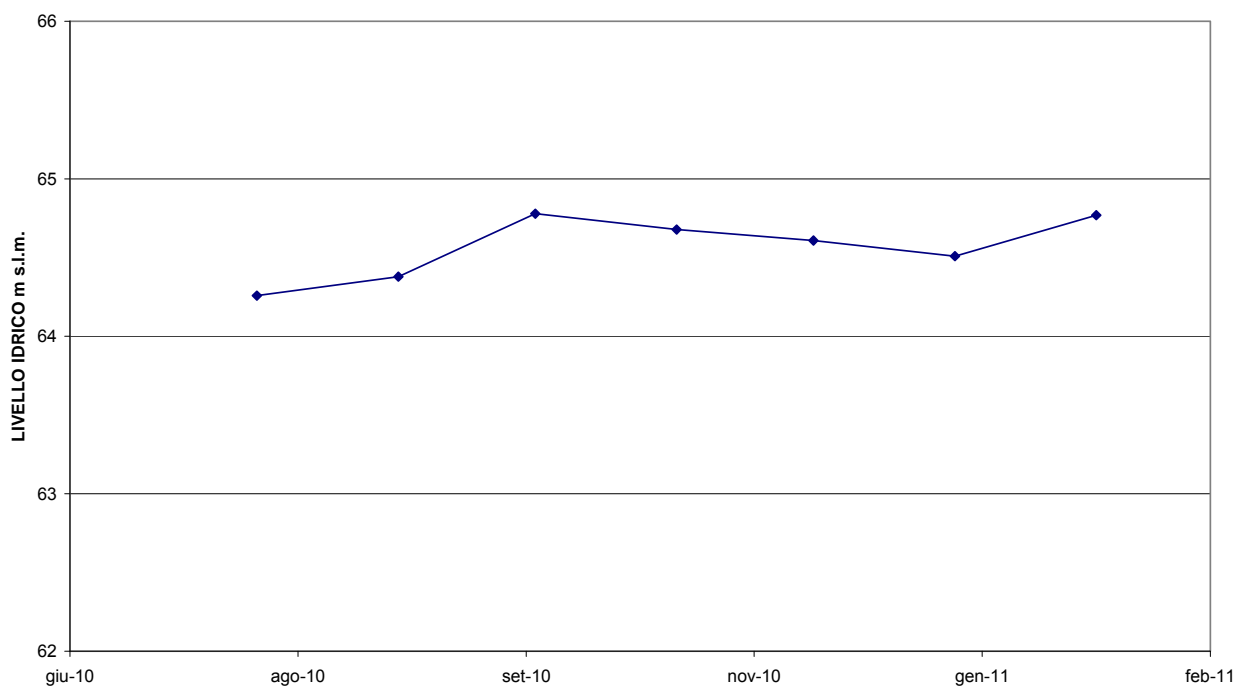


PIEZOMETRO (Tubo aperto) S455

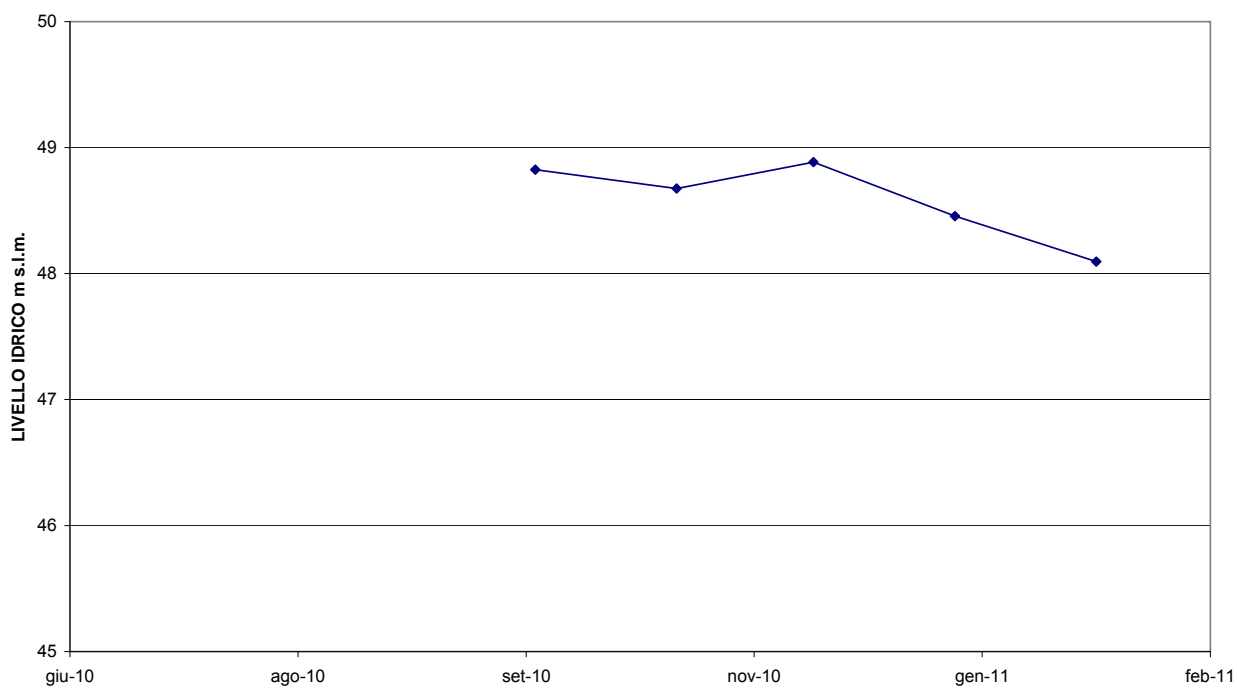


		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

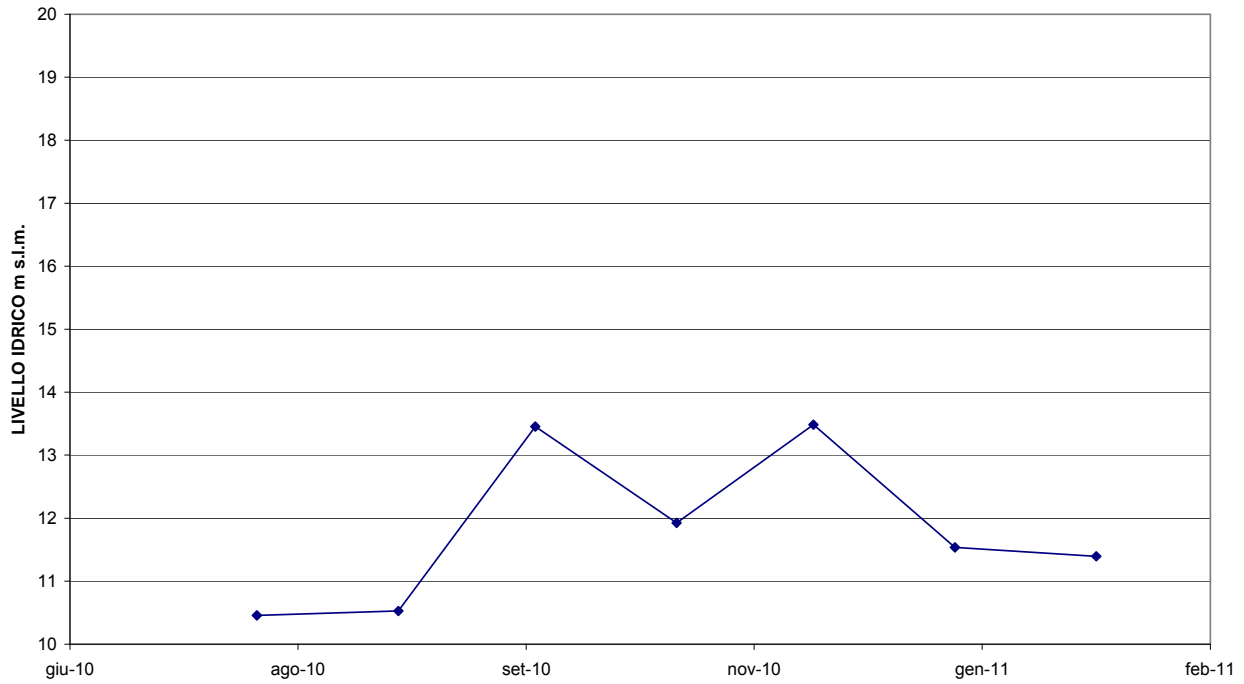
PIEZOMETRO (Casagrande) S456



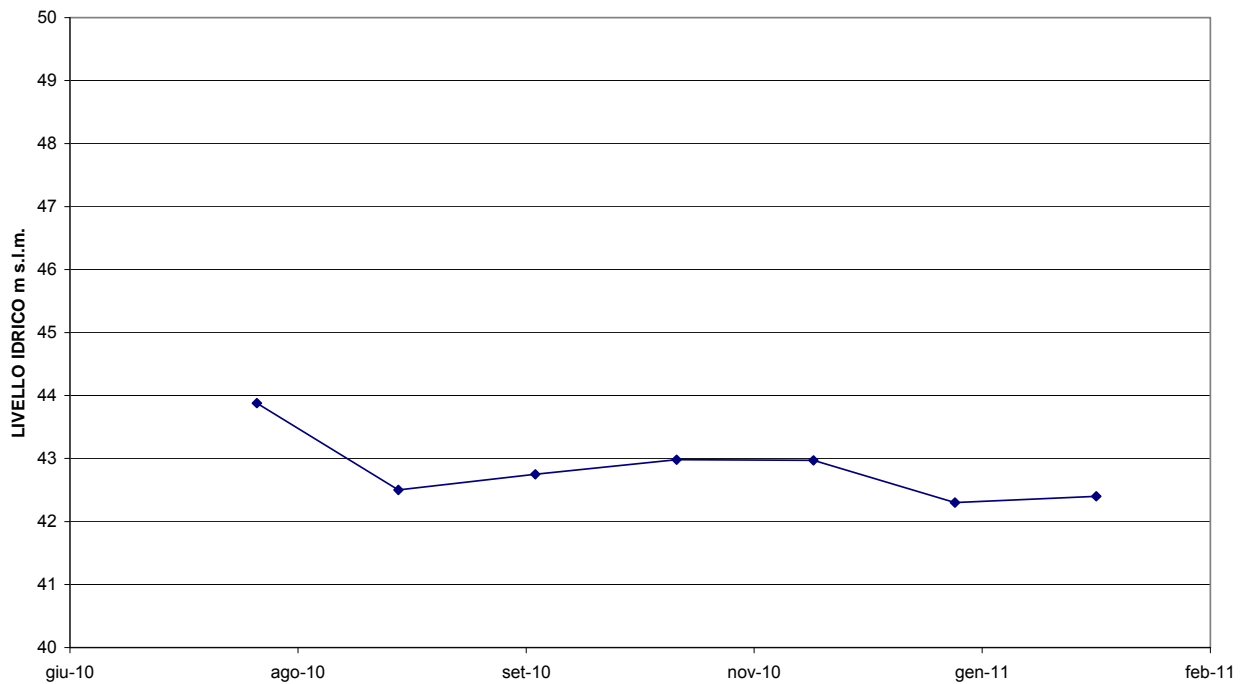
PIEZOMETRO (Casagrande) S457



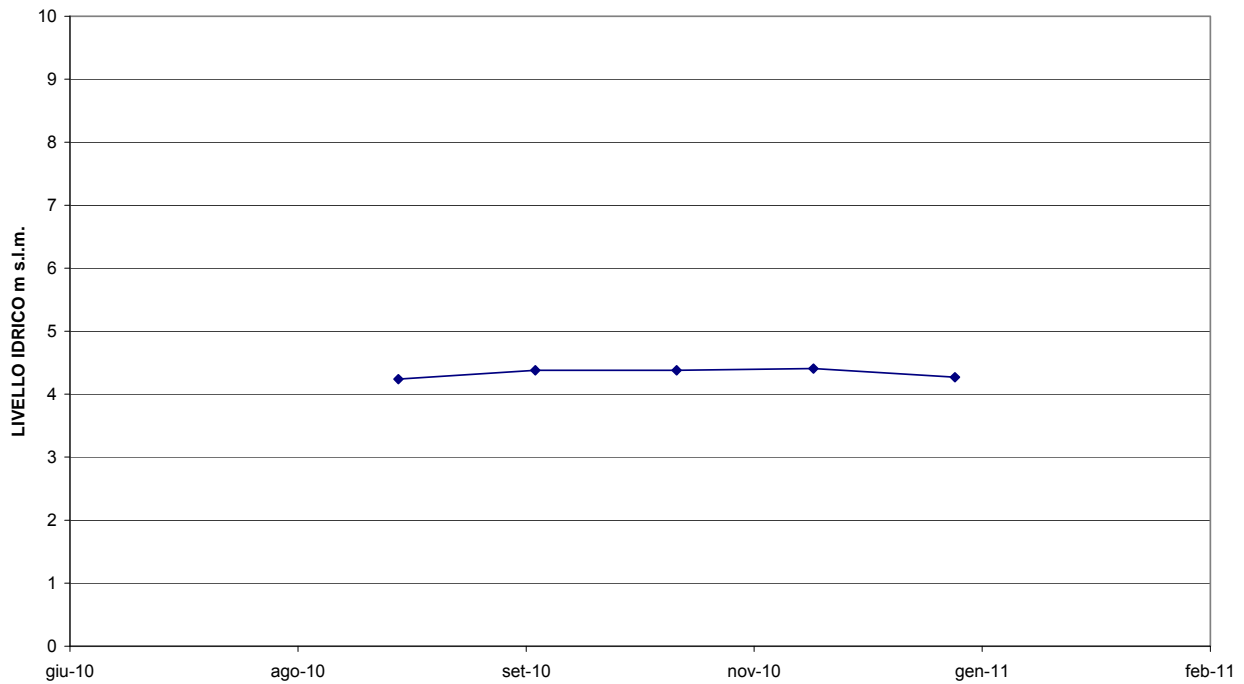
PIEZOMETRO (Casagrande) S459



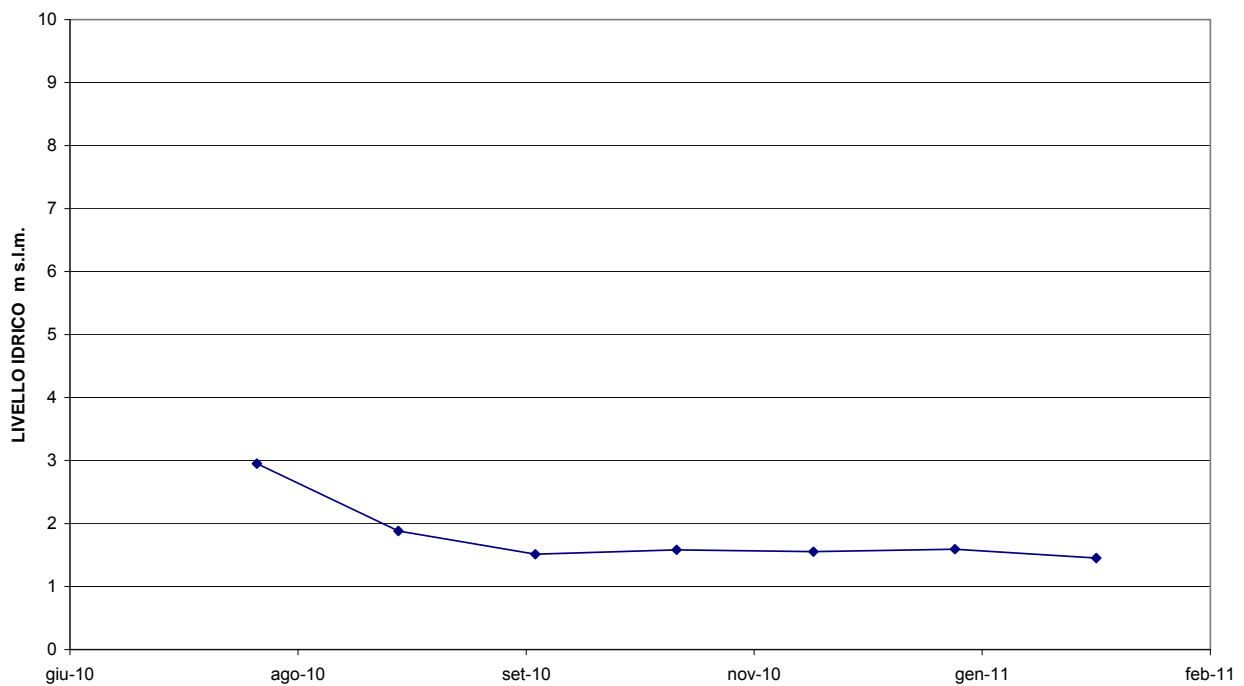
PIEZOMETRO (Casagrande) S459bis



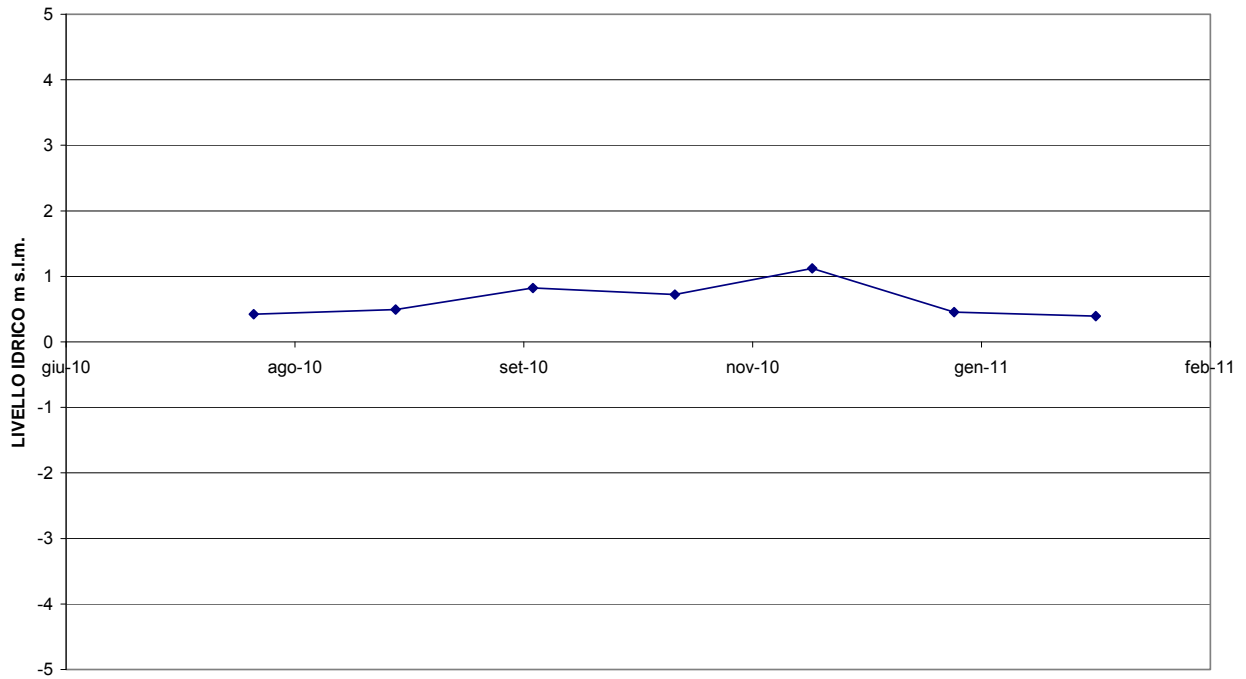
PIEZOMETRO (Tubo aperto) S460



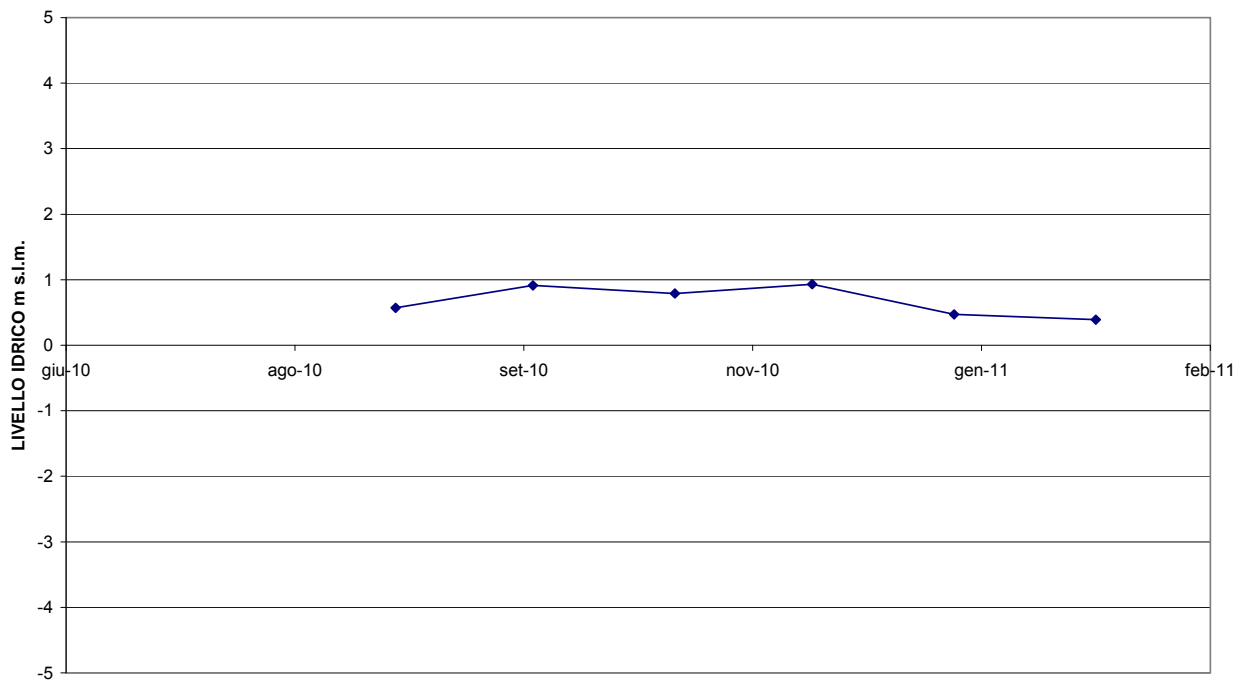
PIEZOMETRO (Tubo aperto) S463



PIEZOMETRO (Casagrande) S464bis

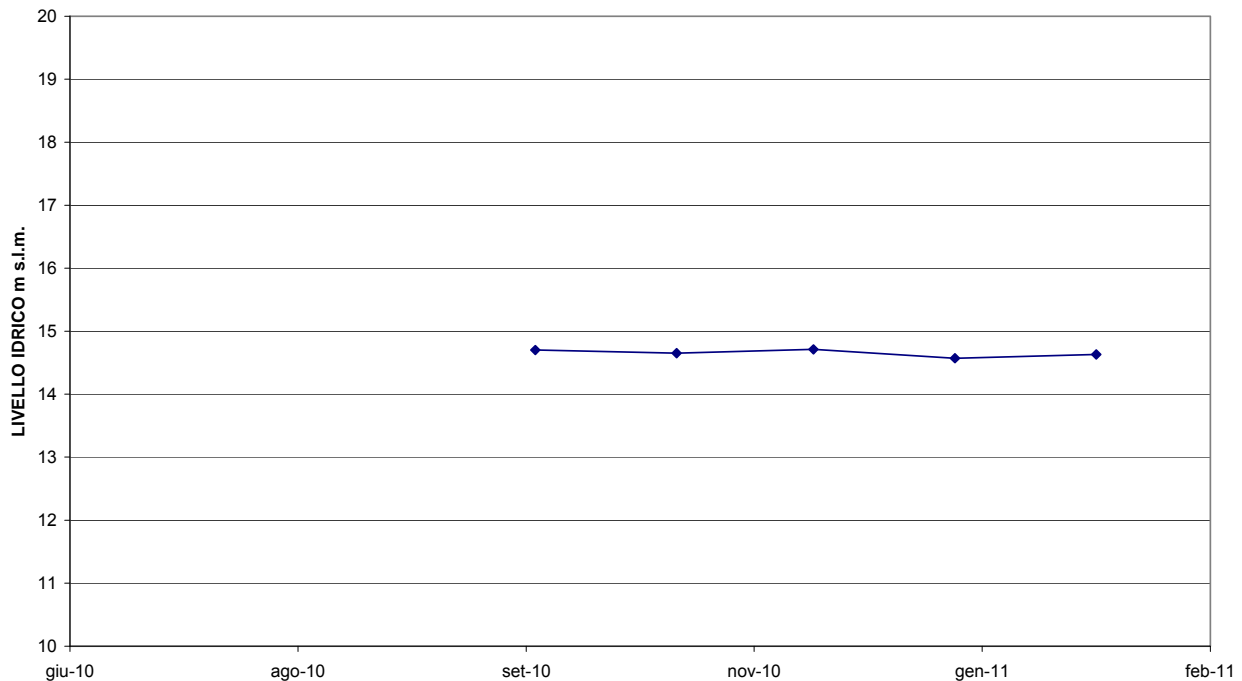


PIEZOMETRO (Casagrande) S465



		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

PIEZOMETRO (Tubo aperto) S466



I singoli grafici non evidenziano variazioni significative della piezometrica, al massimo pochi metri nel periodo considerato. Occorre inoltre precisare, che il periodo esaminato, purtroppo non è del tutto rappresentativo, in quanto non riporta un intero ciclo annuale.

3.4 Idrologia

L'infiltrazione efficace su tutta l'area di progetto è stata determinata in sede di studi generali. Da tali studi emerge che nell'area di interesse l'infiltrazione di acqua meteorica che contribuisce ad alimentare i sistemi di flusso nell'acquifero è molto modesta. Sulla gran parte dell'area l'infiltrazione efficace sembra non essere presente oppure è molto bassa a causa dell'elevata evapotraspirazione. Nella piana costiera esistono solo pochi settori ove l'infiltrazione efficace è superiore a 0, attestandosi su valori dell'ordine dei 100-200 mm/a. Nella zona collinare allo stesso modo l'infiltrazione è per la maggior parte dell'area pari a 0 e solo lungo lo spartiacque idrografico tra versante tirrenico e ionico sono state calcolate infiltrazioni efficaci perlopiù di ordine inferiore ai 100mm/a e solo raramente dell'ordine dei 100-200mm/a.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

3.5 Modello idrogeologico concettuale

L'area di interesse è sede di una circolazione idrica sotterranea che si sviluppa all'interno del complesso idrogeologico acquifero sopra descritto. In tale complesso sono presenti dei sistemi di flusso a falda libera con gradienti estremamente modesti a causa della scarsa infiltrazione efficace, che hanno come livello di base quello del mare e dei Pantani, che sono in collegamento con quest'ultimo. La distribuzione della superficie della falda è stata rappresentata nelle carte idrogeologiche degli "studi di base", a cui si può fare riferimento per la discussione che segue. La superficie della falda freatica non supera mai i 2,5m di quota, sebbene il rilievo in alcuni settori raggiunga e superi i 100m. Ne risulta quindi una superficie freatica estremamente appiattita, come peraltro è logico attendersi quando si prendono in considerazione i valori di infiltrazione estremamente bassi.

Schematizzando per esigenze descrittive, possono essere identificati due sistemi di flusso separati da uno spartiacque idrogeologico che per grandi linee coincide con lo spartiacque idrologico superficiale che separa il versante tirrenico da quello ionico.

A nord dello spartiacque i flussi sono diretti verso il Mar Tirreno con direzione da S-N a SW-NE, mentre a sud dello spartiacque i flussi sono diretti verso il Mar Ionio con direzione variabile da NE-SW a NW-SE. In entrambi i casi i gradienti piezometrici sono estremamente bassi e dell'ordine al massimo dello 0,5% nella parte a monte della piana costiera, mentre si riducono a meno dello 0,1% in corrispondenza di quest'ultimo settore. Una zona molto limitata, quella a ridosso del Pantano Piccolo, presenta flussi in direzione circa E-W con gradiente estremamente ridotto e pari a circa lo 0,1% per tutta l'area collinare, mentre in questo settore il gradiente è praticamente pari a 0 in tutta la fascia costiera.

Peraltro il minor gradiente della falda a monte del Pantano Piccolo rispetto al pantano Grande giustifica anche la maggior salinità delle acque del primo rispetto a quelle del secondo, ricevendo quest'ultimo maggiori apporti di acque dolci dall'entroterra.

Verosimilmente il gradiente idraulico è decisamente più elevato nella zona collinare perché in questo settore il flusso avviene all'interno delle ghiaie e sabbie di Messina che, pur essendo un mezzo permeabile, presentano tuttavia un grado di permeabilità inferiore rispetto a quella dei depositi alluvionali della piana costiera che sono quindi in grado di trasmettere un flusso maggiore anche in condizioni di gradiente minore.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

3.5.1 Considerazioni sulle risorse idriche sfruttate nella zona

La falda freatica presente all'interno delle ghiaie e sabbie di Messina e dei soprastanti depositi alluvionali è ad oggi oggetto di sfruttamento piuttosto intenso da parte di una serie di pozzi ad uso privato idropotabile e pubblico acquedottistico. Si può fare riferimento alla cartografia idrogeologica allegata al presente rapporto per osservare la distribuzione dei pozzi.

I pozzi con portate di emungimento nominale maggiori sono ubicati nell'intorno del Pantano Grande. Più in particolare la zona di emungimento più consistente si trova immediatamente a est e nord-est dello specchio d'acqua. Si tratta dei pozzi acquedottistici 29 e 30 che complessivamente hanno una portata nominale di 8,5 l/s, nonché dei pozzi 79, 80, 81 e 82 che complessivamente sviluppano una portata nominale superiore ai 10 l/s.

Un altro settore di sfruttamento intensivo è localizzato a monte del Pantano Grande in corrispondenza della sua zona mediana, ove sono presenti i pozzi ad uso privato 42, 70 e 78, che complessivamente hanno portate nominali superiori ai 20 l/s.

Nel settore compreso tra il Pantano di Ganzirri ed il Pantano di Faro sono invece presenti numerosi pozzi ad uso privato idropotabile che hanno portate nominali basse dell'ordine degli 1-3 l/s, ma che complessivamente arrivano a sviluppare portate superiori ai 10 l/s.

Anche se verosimilmente non tutti i pozzi della regione emungono in permanenza si delinea comunque un quadro generale di sfruttamento su portate complessive di ordine superiore ai 30-40 l/s.

Questi dati aggiungono dunque una ulteriore variabile alla definizione del bilancio dei Pantani rispetto a quelle già citate al paragrafo precedente e mostrano che il contesto idrogeologico in cui i laghi si inseriscono è già modificato in maniera piuttosto artificiosa. Gli apporti che originariamente i laghi ricevevano dalla falda dovevano dunque essere assai diversi da quelli attuali.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

4 Modellizzazione numerica 3D

4.1 Problematiche progettuali e obiettivi della modellazione numerica

La modellazione numerica della circolazione idrica sotterranea nella zona dei Pantani di Ganzirri ha come scopo quello di definire i seguenti aspetti:

- Rapporti possibili tra i Pantani la circolazione idrica sotterranea nel loro intorno e il mare;
- Effetti temporanei prodotti dalla realizzazione delle opere in progettazione sulla circolazione idrica sotterranea e possibili ripercussioni sui Pantani a livello idrodinamico;
- Situazione idrogeologica a lungo termine per l'area delle opere dopo la loro realizzazione.
- Diretrici e tempi di deflusso in falda ai fini della determinazione di possibili modificazioni dello stato chimico (inquinamenti ecc.)

Alla luce dei documenti progettuali si è ritenuto che l'opera principale di cui tenere conto ai fini della modellizzazione sia rappresentata dalle torri del ponte e più in particolare dalle loro fondazioni, che, durante la loro realizzazione implicheranno lo scavo di pozzi in falda fino a profondità pari a -15m. Ciò potrà determinare un temporaneo emungimento delle acque che eventualmente dovessero filtrare attraverso i vari tamponi che verranno messi in opera e quindi un possibile, seppur limitato emungimento della falda (al riguardo, come descritto al capitolo 3, il progetto ha messo in campo tutti i possibili interventi al fine di scongiurare/minimizzare qualsiasi effetto drenante durante lo scavo).

Le altre opere sono che al ponte si collegano, sebbene di grande rilevanza, anche dal punto di vista volumetrico, non possono essere considerate come opere particolarmente determinanti nei rapporti con la circolazione sotterranea. L'opera di ancoraggio si sviluppa infatti completamente sopra falda, così come le gallerie. Le fondazioni dei viadotti non implicano scavi di particolare rilevanza e non prevedono quindi significativi emungimenti. Tutte queste opere sono comunque state considerate nel modello numerico, se non altro al fine di stabilire con quale velocità di flusso e in quale direzione eventuali immissioni in falda a partire dal loro punto di collocazione si propagherebbero.

Venendo invece più in dettaglio alle modalità realizzative dell'opera principale, ovverosia le fondazioni delle due torri, vale la pena fare un breve richiamo sugli aspetti più rilevanti ai fini del modello idrogeologico, che sono i seguenti:

- Il diametro dello scavo è pari a metri 55 circa per ognuna delle due fondazioni;
- L'approfondimento massimo sarà di 15m;

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

- L'approfondimento avverrà previa realizzazione di diaframmi impermeabili su tutta la circonferenza dei pozzi;
- Prima dell'inizio dello scavo verrà realizzato un tappo di fondo tramite jet grouting finalizzato a una drastica riduzione della permeabilità. Il volume trattato con jet grouting sarà compenetrato con la parte bassa dei diaframmi in modo da formare una barriera all'ingresso delle acque all'interno dei pozzi.
- Lo scavo in approfondimento avverrà ovviamente sotto pompaggio delle acque che, seppur limitatamente, filtreranno dal tappo di fondo.

Attraverso il modello numerico tridimensionale è stata dapprima ricercata una configurazione che riproduce lo stato naturale. Successivamente è stata simulata la condizione transitoria più critica, ossia quella in cui lo scavo delle fondazioni delle torri ha raggiunto la profondità di -15m e la piezometrica viene mantenuta a questa quota. Successivamente sono stati analizzati gli effetti del post-operam a lungo termine, ossia in presenza delle fondazioni in cemento a bassa permeabilità e quindi dell'eventuale effetto barriera sulle acque sotterranee.

Tutti i risultati sono presentati al capitolo "Simulazioni previsionali", attraverso mappe e viste tridimensionali degli output, ma anche attraverso valutazioni quantitative sul bilancio di massa del modello.

Infine, sono riportate alcune valutazioni sulla possibile dispersione di inquinanti, basate anch'esse sugli output del modello numerico.

4.2 Caratteristiche del codice numerico utilizzato

Capire le leggi fisiche che regolano un sistema idrogeologico e descriverlo in modo accurato rende possibile la comprensione quantitativa della relazione causa-effetti del sistema stesso. Questo permette di fare previsioni relativamente a come il sistema reagirà al variare degli stress applicati (anche superiori alle condizioni normalmente osservate).

Premettendo che qualsiasi modello rappresenta una semplificazione di uno o più fenomeni fisici reali (Hill, 2003), un modello matematico di flusso simula appunto il flusso delle acque sotterranee sia attraverso le equazioni che governano i processi fisici che hanno luogo nel sistema, sia attraverso le equazioni che descrivono gli andamenti nello spazio e nel tempo dei carichi e/o dei flussi lungo i confini del dominio (condizioni al contorno) (Anderson & Woessner, 1991). Le condizioni al contorno assegnate ad un modello governano le soluzioni; infatti i risolutori delle equazioni sono elaborati partendo dalle condizioni stesse. Le equazioni di flusso sono risolte con metodi di calcolo numerico, i più noti dei quali sono il metodo alle differenze finite ed il metodo agli

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

elementi finiti; in entrambi i casi il dominio di studio viene discretizzato mediante un sistema geometrico a reticolo con relative celle o “nodi”.

Per il presente lavoro la necessità di riprodurre in tre dimensioni e con dettaglio le geometrie delle opere ingegneristiche ha portato alla scelta del codice numerico FEFLOW, che calcola tridimensionalmente i flussi delle acque sotterranee attraverso il metodo degli elementi finiti; esso inoltre permette di simulare il flusso a densità variabile e quindi di riprodurre il fenomeno dell'intrusione marina e le sue interazioni con le opere.

Il software FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system) è un programma di calcolo del flusso delle acque sotterranee in problemi bi- e tri-dimensionali, su piante o sezioni (orizzontali, verticali, o a simmetria radiale) o in problemi a densità variabile del fluido, per condizioni parzialmente o completamente sature, allo stato transitorio o stazionario, ma anche in problemi di trasporto di flusso, massa o calore (Diersch, 2006).

Per la vicinanza della zona di interesse alla linea di costa, si è ritenuto necessario considerare l'eventuale effetto indotto dal cuneo di intrusione salina sul flusso delle acque sotterranee; infatti, negli acquiferi costieri esiste una zona di transizione (anche detta interfaccia) tra le acque dolci della falda sotterranea e le acque marine del cuneo salino, come noto dalle consolidate teorie idrodinamiche al riguardo (Ghyben, 1888; Herzberg, 1901; Fetter, 1994; Figura 1). Questo significa che, in prossimità della linea di costa, la salinità (e quindi la densità) variabile delle acque influenza significativamente la rete di flusso nell'acquifero.

Nei sistemi idrogeologici a densità variabile il flusso determina una ridistribuzione del soluto e quindi variazioni spazio-temporali delle sue concentrazioni; a sua volta questa ridistribuzione del soluto modifica il campo delle densità quindi i carichi piezometrici e la rete di flusso. Per questo motivo flusso e trasporto in FEFLOW procedono accoppiati e le due equazioni sono risolte congiuntamente.

Il modello del settore dei Pantani di Ganzirri e Faro è stato implementato quindi in modo tale da realizzare una prima simulazione a densità variabile finalizzata a riprodurre una geometria della zona di transizione “teorica”, ma quantitativamente compatibile con il modello idrogeologico concettuale ed in condizioni di equilibrio (ossia calcolata in regime transitorio ma fino al raggiungimento delle condizioni stazionarie per stabilizzazione dei carichi e delle masse nel dominio modellizzato). La geometria della zona di transizione è infatti il risultato dell'equilibrio tra il flusso idrogeologico di acqua dolce in entrata da monte e la tendenza, a causa della maggior densità, all'intrusione verso la terraferma dell'acqua salata, in relazione ai parametri idrodinamici dell'acquifero ed al carico idraulico applicato.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Rev</i></th> <th><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

Il modello realizzato è dunque un modello che riproduce il flusso delle acque sotterranee tenendo conto delle loro variazioni di densità (modello di flusso a densità variabile). Esso considera quindi la presenza di acque “salate” nella zona costiera (a densità e salinità dell’acqua di mare) e nei Pantani (a densità e salinità corrispondenti a quelle reperite da bibliografia relativamente a questi corpi d’acqua interni). Il modello è stato costruito tridimensionalmente e le soluzioni calcolate sono tridimensionali, sia in termini di carichi piezometrici (m s.l.m.), che di concentrazioni di sali disciolti (mg/l).

Si evidenzia che questo tipo di simulazioni, che devono essere necessariamente processate allo stato transitorio, come verrà illustrato oltre nel testo, effettuate su un modello tridimensionale di geometria irregolare, sono tra le più complesse sia in termini di implementazione del modello, che in termini di scelta dei parametri di calcolo usati dal risolutore; inoltre richiedono tempi di elaborazione piuttosto lunghi, che nel caso in oggetto partono da un minimo di 2 ore ad un massimo di circa 12 ore.

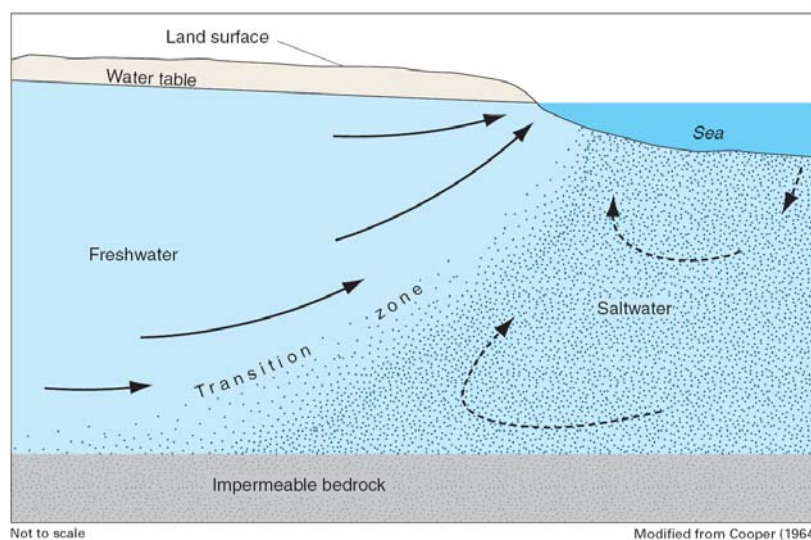


Figura 1 – Circolazione di acque sotterranee a differente salinità lungo la zona di transizione in un acquifero costiero (Barlow, 2003).

4.3 Dati di base e metodologia applicata

Un modello numerico deriva da un modello idrogeologico concettuale e non vale il contrario, anche se spesso l’elaborazione del modello numerico porta ad affinamenti del modello concettuale. La scelta delle semplificazioni che stanno alla base della sua implementazione dipende strettamente

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

dal modello concettuale costruito. Poiché il modello concettuale dipende fortemente dalla qualità e quantità dei dati disponibili per la sua definizione, è ovvio che l'affidabilità del modello numerico dipende fortemente dai dati di *input* a disposizione, oltre che dal processo di interpretazione e semplificazione dei dati nella definizione del modello concettuale. Quindi, è vero che un modello numerico può essere un ottimo strumento per la simulazione di sistemi idrogeologici complessi, non risolvibili con semplici modelli analitici, ma non va dimenticato che tanto maggiore è il grado di complessità, tanto maggiore è la mole di dati di *input* e dei dati di calibrazione necessari alla costruzione di un modello affidabile (Anderson & Woessner, 1991). Occorre anche tener presente che qualsiasi sistema naturale è complesso ed eterogeneo, ma i modelli non hanno lo scopo di riprodurre con dettaglio estremo tutti gli aspetti di un sistema e sono inevitabilmente una semplificazione della realtà: è quindi opportuno trovare la giusta misura tra la semplificazione e la fedeltà al dato reale (Hill, 2003).

4.3.1 Stato naturale della falda

L'affidabilità di un modello numerico dipende dal grado di calibrazione raggiunto rispetto ai dati sperimentali. Per la calibrazione di un modello di flusso a densità variabile sono necessari sia dati piezometrici per la calibrazione dei carichi, che dati chimici (salinità o conducibilità elettrica delle acque) per la calibrazione del trasporto del sale, ossia per verificare che la geometria e l'estensione della zona di transizione acqua dolce-acqua salata siano rappresentative della realtà.

Distribuzione piezometrica

Nel caso in oggetto sono stati considerati, oltre ai dati geologici di base derivanti dallo studio geologico generale redatto a cura del Prof. Lentini, i dati piezometrici anch'essi derivanti dagli studi idrogeologici generali redatti a cura del Prof. Ferrara. Tali dati sono sintetizzati in una carta piezometrica ricostruita a partire da misure del livello piezometrico effettuate su pozzi esistenti, come desunto dalle schede pozzo allegate alla relazione idrogeologica. Tale ricostruzione è stata inoltre validata attraverso il confronto dei dati piezometrici ricavati dai piezometri predisposti da Eurolink e dai piezometri del *monitoraggio di area vasta* nel settore circostante i Pantani di Ganzirri (cfr. elaborato CG0800ARXDSI700IR00000001A, B, C). Nel precedente paragrafo 3.3.2 è riportato il dettaglio del monitoraggio piezometrico ad oggi eseguito.

La piezometria utilizzata si riferisce a dati mediati sul periodo aprile-giugno 2010. Sostanzialmente da questa piezometria emerge che allo stato naturale i carichi idraulici sono molto bassi su tutta l'area del modello. I carichi maggiori si riscontrano sotto la dorsale spartiacque tra Mar Tirreno e Ionio, dove superano di poco i 2m sul bordo ovest del modello, scendendo poi gradualmente fino a

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

quote di poco superiori allo 0 in prossimità della piana costiera dei Pantani e della costa tirrenica. Nei settori di piana costiera i carichi risultano sempre compresi tra 0 e 0,5m. I gradienti idraulici sono ovviamente maggiori in corrispondenza dello spartiacque anche per effetto della minor permeabilità dell'acquifero, costituito dalle ghiaie e sabbie di Messina rispetto alla zona costiera ove affiorano i depositi alluvionali.

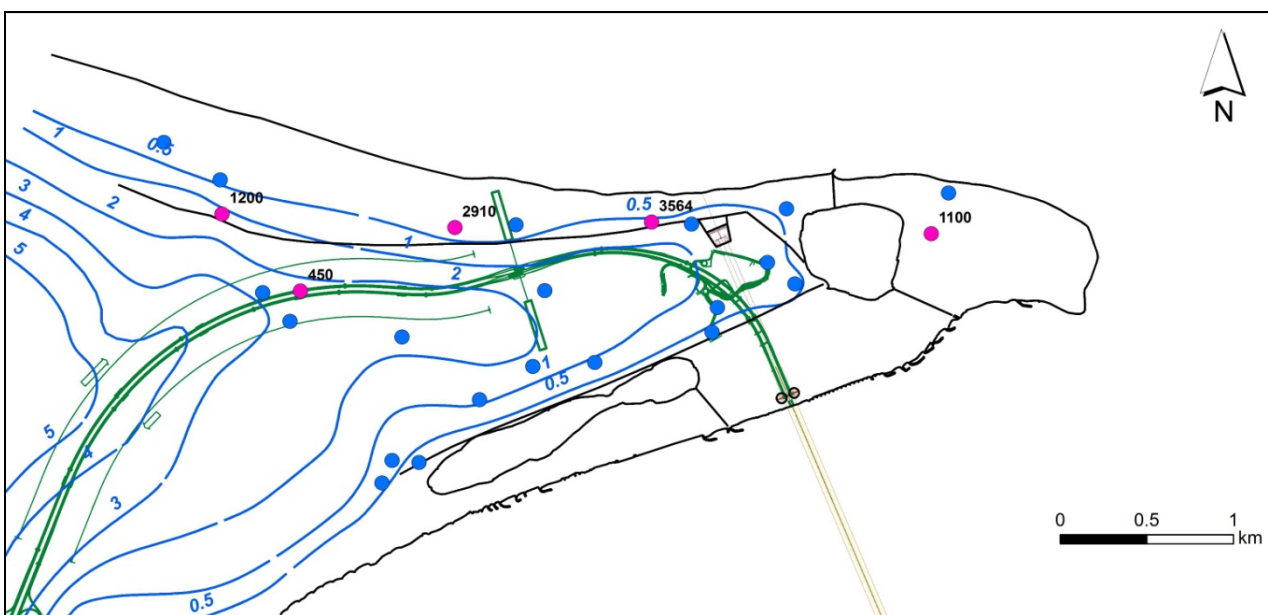


Figura 2 – Superficie piezometrica di riferimento e punti di misura piezometrica (pallini blu) e conducibilità elettrica (pallini magenta).

Distribuzione della concentrazione salina in falda

Per quanto attiene alla salinità, anche in questo caso è stato fatto riferimento ai dati ricavati dal monitoraggio nei piezometri predisposti da Eurolink e nei piezometri del *monitoraggio di area vasta*. Pur essendo entrambe le serie di piezometri distribuite abbastanza diffusamente su tutta l'area di interesse, solo i piezometri Eurolink, forniscono una copertura anche sulla dorsale spartiacque tra le due coste, mentre i piezometri del monitoraggio di area vasta forniscono una miglior copertura sulla zona costiera. La distribuzione dei piezometri Eurolink e una interpretazione dei loro dati di salinità (espressi come conducibilità elettriche) viene fornita in Figura 3; la distribuzione dei piezometri del monitoraggio di area vasta è invece illustrata nell'elaborato CG0800AG5DSI700ID00000005.

L'analisi congiunta delle due serie di dati permette di stabilire il modello di riferimento per la distribuzione della salinità nell'area di interesse.

In generale, al di sotto della dorsale spartiacque tra le due coste il sistema di flusso idrogeologico

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

presenta conducibilità elettriche basse inferiori ai 7.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e quindi salinità dell'ordine dei 4-5 g/l. In questo settore le acque sono quindi prevalentemente dolci, o al più debolmente salate.

Nella piana costiera ionica, intorno ai Pantani la conducibilità elettrica, e quindi la salinità, è molto alta già a profondità ridotte; essa supera sistematicamente i 20.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, (12-14 g/l) dopo pochi metri di profondità al di sotto della superficie di falda. Nella parte alta della falda (primi 2-5m) esistono invece acque dolci con conducibilità elettriche comprese tra 2.000 e 5.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (1,5 – 3,5 g/l).

Sulla costa tirrenica i dati disponibili sembrano indicare che fino a distanze dell'ordine dei 100-150m dal mare esiste una situazione del tutto analoga a quella dell'area dei Pantani, mentre più lontano dal mare, avvicinandosi al versante nord della dorsale spartiacque tra le due coste, lo spessore dello strato di acque dolci sembra tendere a un progressivo ispessimento e l'acqua salmastra inizia a comparire solo al di sotto dei 10m di profondità.

Sintetizzando, per l'area di studio si profila quindi una situazione in cui esiste un livello superficiale del sistema di flusso ove sono presenti delle acque dolci o debolmente salate. Sotto questo primo strato di acque dolci si passa invece più o meno bruscamente ad una situazione di acque salmastre ad elevata salinità. Nella zona costiera ionica e tirrenica il livello di acque dolci ha spessori dell'ordine dei 2-10m al massimo, mentre sembra verosimile che sotto la dorsale spartiacque tra le due coste l'interfaccia acqua dolce/acqua salata si approfondisca a causa dei maggiori carichi idraulici.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

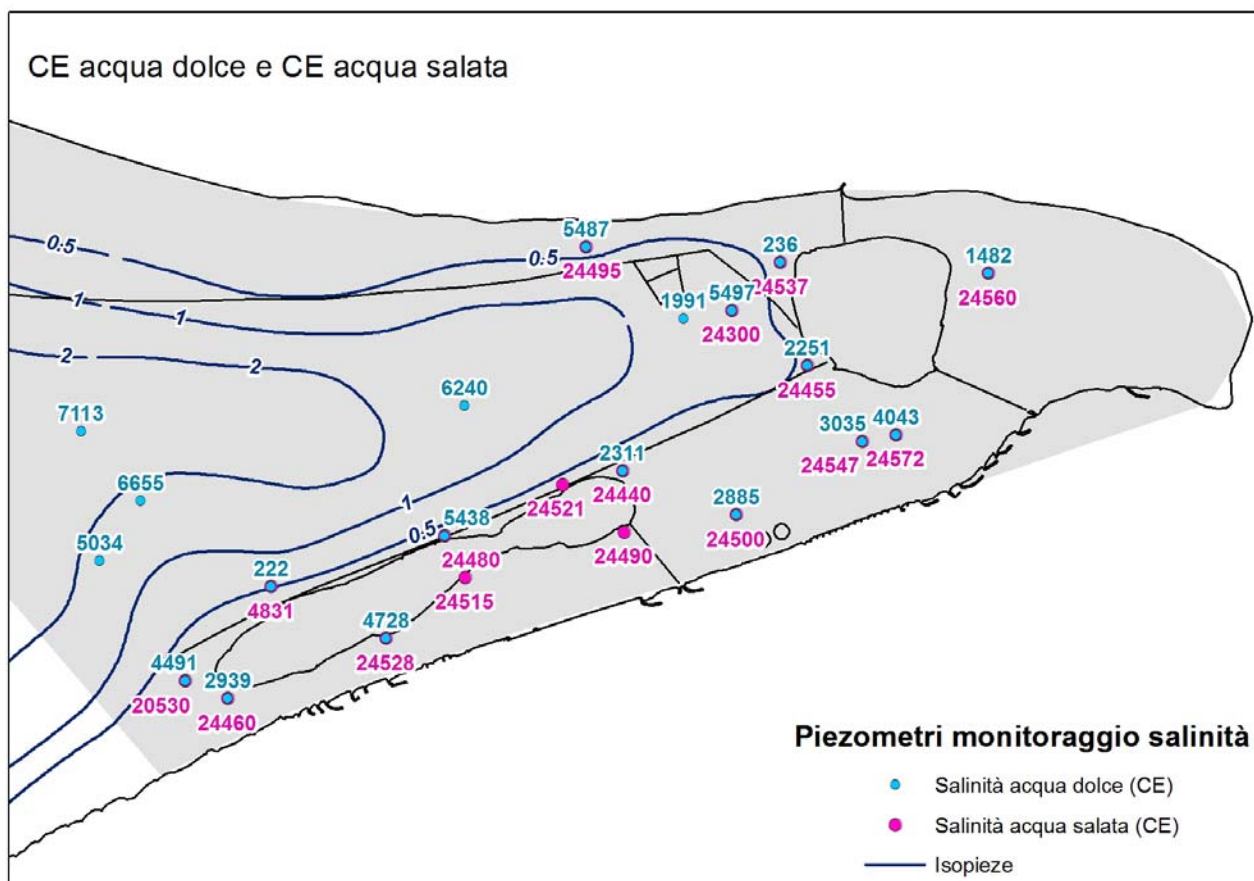


Figura 3 – Superficie piezometrica di riferimento e punti di rilevamento della conducibilità elettrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) nei piezometri realizzati da Eurolink; i dati in blu si riferiscono alla conducibilità media registrata nello strato di acqua dolce superficiale (2-10m ca. a seconda delle zone), mentre i dati in viola si riferiscono alla conducibilità media al di sotto dello strato di acqua dolce.

In questo contesto di variazioni piuttosto graduali del contenuto salino spiccano alcune anomalie, probabilmente legate a situazioni locali molto particolari. Tra queste si notino per esempio due punti con acqua a bassissima conducibilità in superficie, uno localizzato immediatamente a nord-ovest del Pantano Piccolo (236 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e un altro immediatamente a nord-ovest del Pantano Grande (222 $\mu\text{S}/\text{cm}$), rilevati dai piezometri Eurolink. Situazioni di questo tipo sono verosimilmente molto localizzate e potrebbero essere connesse sia ad irrigazione, sia a falde sospese di modesta estensione.

Altri due punti con conducibilità piuttosto anomala nella parte superficiale della falda se confrontati con il contesto circostante sono quello collocato ad est del Pantano Piccolo, con conducibilità di 1482 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e quello ubicato a ovest ed a monte dello stesso specchio d'acqua, con conducibilità di 1991 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Il primo è anomalo perché nella sua posizione, compresa tra il Pantano piccolo ed

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

il mare, sarebbe ipotizzabile una conducibilità ben maggiore; il secondo rappresenta invece un'eccezione perché la conducibilità media della dorsale spartiacque mostra generalmente valori nettamente più alti.

4.3.2 Metodologia applicata

Sulla base di dei dati disponibili la modellizzazione è stata realizzata sostanzialmente in tre fasi principali:

1. Modello iniziale su dominio ampio
2. Modello su dominio ristretto
3. Verifica finale su dominio ampio

Nella Fase 1 è stato realizzato un modello su un dominio ampio (7,970,988 m²), finalizzato alla riproduzione di una zona di transizione la cui geometria ed estensione fosse coerente con il modello idrogeologico concettuale e permettesse la calibrazione della piezometria di riferimento e delle salinità misurate dai logs. In particolare il modello ampio comprende tutta la zona del Capo Peloro, includendo i due specchi d'acqua oggetto di studio ed interessa sia la costa ionica che la costa tirrenica, includendo quindi lo spartiacque collinare tra i due litorali.

Su questo modello ampio è stato poi simulato in via preliminare l'emungimento delle acque sotterranee dalla zona delle fondazioni delle torri del ponte con portate sufficienti ad abbassare i carichi fino alla quota prevista da progetto, al fine di verificare l'estensione della zona di influenza (cono di pompaggio).

A causa dei limiti tecnici nel raffittimento della mesh di calcolo, imposti dalle dimensioni del dominio e dai tempi di calcolo, questa simulazione è proceduta senza vincoli geometrici nella zona delle fondazioni e soprattutto senza alcun impedimento al flusso (grouting, diaframmi ecc.). Essa è quindi servita per ottenere delle prime stime di influenza ampiamente cautelative, perché l'emungimento dalle fondazioni in questa prima simulazione è decisamente maggiore che per le condizioni di progetto. Con questo primo modello su dominio ampio si è dunque stimata, per eccesso, la massima estensione possibile della zona di influenza degli emungimenti dai pozzi di fondazione in fase costruttiva.

Nella Fase 2 gli output del dominio ampio hanno permesso così di definire l'estensione di un dominio di flusso più piccolo (936,469 m²), che includesse la zona delle torri e che permettesse di valutarne gli effetti ad una scala di maggior dettaglio, oltre che con una mesh di calcolo più raffinata (che non sarebbe stato possibile definire sul dominio ampio generative non generando lunghissimi tempi di calcolo). In questo modello a scala più piccola sono stati ovviamente inseriti i

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

dettagli delle opere di fondazione (fatte salve alcune semplificazioni). Gli output del dominio ampio hanno inoltre permesso di definire le condizioni al contorno e le condizioni iniziali nel dominio piccolo, assicurando così una fedeltà al modello idrogeologico concettuale, garantita dalla calibrazione del dominio ampio sui dati di campo.

Nella Fase 3 le portate emunte dai pozzi di fondazione ottenute con il modello a dominio ristretto, quindi più precise rispetto a quelle inizialmente ottenute con la simulazione della Fase 1, soprattutto perché hanno preso in conto gli interventi di controllo degli scavi (grouting e diaframmi) previsti in progetto, sono state imposte come condizione di emungimento dalla zona delle fondazioni nel modello ampio. Ciò ha permesso di ritornare ad eseguire una valutazione su vasta scala dell'impatto effettivo dell'opera e soprattutto di valutare le variazioni dei bilanci arrivi/perdite degli specchi d'acqua dei Pantani. In questa ultima simulazione in transitorio nel modello ampio sono anche state inserite le fondazioni del viadotto Pantano immaginando che la loro costruzione avvenga simultaneamente alla realizzazione delle fondazioni delle torri.

Le attività di modellazione per il dominio ampio durante la Fase 1 si sono svolte nel seguente modo:

- costruzione tridimensionale della topografia, a partire dai dati topografici disponibili;
- individuazione delle superfici di contatto tra i diversi copri idrogeologici dalle mappe e sezioni geologiche disponibili;
- delimitazione del dominio di flusso in FEFLOW, sulla base del modello concettuale dell'acquifero, ed inserimento delle superfici tridimensionali;
- assegnazione delle proprietà idrogeologiche agli elementi della mesh (reticolo di elementi finiti);
- assegnazione delle condizioni al contorno per il flusso e per il trasporto;
- simulazione della rete di flusso e della distribuzione della massa salina nel dominio nelle condizioni naturali ante-operam; calibrazione con i dati piezometrici e di concentrazione disponibili;
- simulazione delle condizioni di massimo abbattimento piezometrico in corso d'opera.

Le attività di modellazione per il dominio piccolo durante la Fase 2 si sono svolte nel seguente modo:

- estrazione della topografia dal dominio ampio;
- raffittimento della discretizzazione verticale, con inserimento di ulteriori slices (livelli orizzontali di suddivisione del reticolo di elementi finiti);
- assegnazione delle proprietà idrogeologiche agli elementi della mesh;

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

- estrazione delle condizioni al contorno dal modello calibrato sul dominio ampio ed inserimento nel dominio piccolo;
- realizzazione delle simulazioni previsionali.

I dati di base consultati ed utilizzati per la modellazione numerica sono:

- relazione idrogeologica generale allegata al progetto (Prof. Ferrara);
- cartografia geologica ed idrogeologica generale di progetto (Prof. Lentini e Prof. Ferrara);
- topografia vettoriale e batimetrie dei Pantani;
- superficie piezometrica della carta idrogeologica (Prof. Ferrara);
- specifiche tecniche delle opere in progettazione;
- studi bibliografici sui Pantani di Ganzirri.
- informazioni verbali raccolte presso l'Ente gestore delle acque dei Pantani;
- logs di conducibilità elettrica presso i piezometri monitorati.

4.4 Realizzazione dei modelli di flusso

4.4.1 Modellazione su dominio ampio

4.4.1.1 Definizione del dominio ampio

Il dominio di flusso scelto ha un'area di 7,970,988 m². Esso è delimitato dalla linea di costa su tutti i lati, ad eccezione del lato ovest, dove è stato scelto come limite una delle faglie riportate sulla carta geologica. Seppur non sia certo che questa faglia possa compartimentare il flusso all'interno del dominio, essa è orientata con direzione circa N-S, come la direzione di flusso su entrambi i versanti della punta della Sicilia.

Sulla verticale il dominio è delimitato superiormente dalla superficie topografica ed alla base da una superficie piana a quota -150 m s.l.m.

4.4.1.2 Generazione della *mesh* (reticolo di elementi finiti)

La *mesh* è stata generata tenendo in considerazione quelle discontinuità, presenti nella vista in pianta sul modello, che potevano avere influenza sul flusso (ad es. le faglie e i Pantani) o che rappresentavano contatti tra litologie diverse (contatto tra i depositi alluvionali affioranti nella fascia di pianura costiera e le sabbie e ghiaie di Messina affioranti nella parte centrale del dominio) o tra le opere antropiche e le litologie.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

La *mesh* è formata da elementi triangolari (in pianta), che, estrusi nella terza dimensione, formano parallelepipedi a base triangolare. Ogni triangolo ha 3 nodi di calcolo ai suoi vertici. Essa è stata generata impostando una densità maggiore (quindi dimensioni minori dei triangoli e numero maggiore dei nodi di calcolo) nei pressi delle opere antropiche che possono interagire con la falda idrica sotterranea e che era necessario rappresentare con buon dettaglio nelle simulazioni.

In Figura 4 e Figura 5 si può osservare la geometria della *mesh*, rispettivamente in pianta ed in vista tridimensionale.

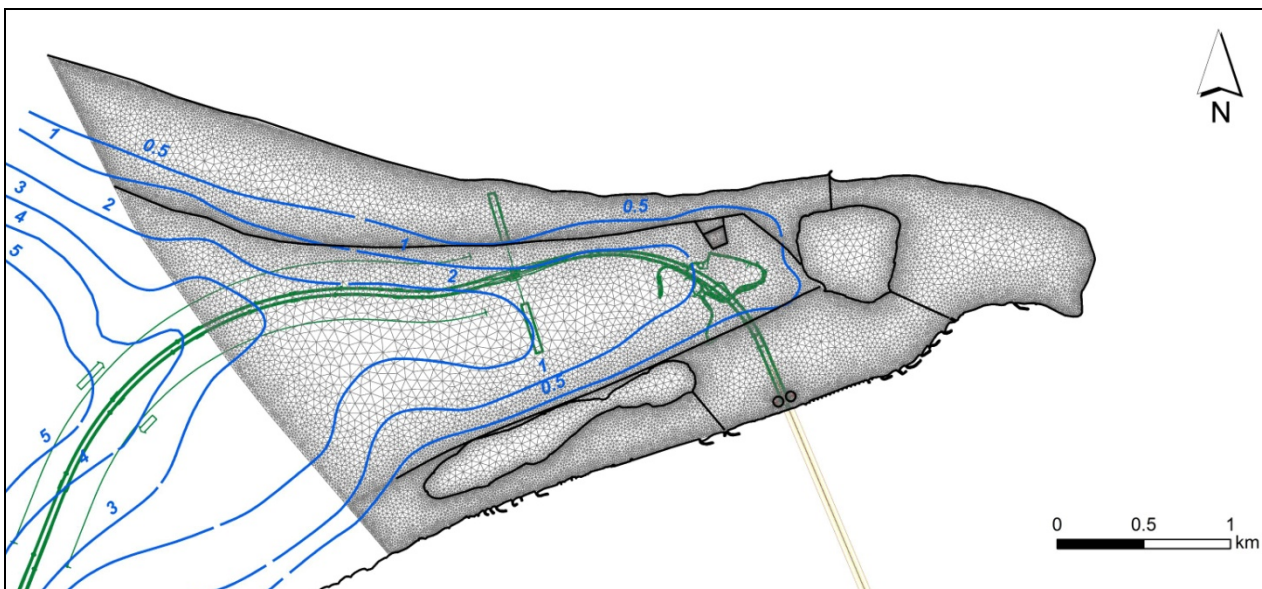


Figura 4. Delimitazione del dominio di modellazione e mesh in pianta del dominio ampio.

4.4.1.3 Discretizzazione verticale

Il dominio di modellazione è stato discretizzato verticalmente (suddiviso in più strati o *layers*) per rappresentare sia le discontinuità stratigrafiche che le principali quote di scavo delle fondazioni, e successivamente raffittito in alcune porzioni al fine di calcolare una buona distribuzione tridimensionale dei carichi e delle concentrazioni saline. Infatti, poiché nel modello i valori idraulici e di massa sono calcolati e restituiti sui nodi, nelle modellizzazioni di flusso a densità variabile è indispensabile creare un numero di *layers* maggiore del numero di acquiferi presenti.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Slice	Limite	Quota (m s.l.m.)	Layer	Unità idrogeologica
1	<i>piano campagna</i>	<i>variabile</i>	1	depositi alluvionali/ sabbie e ghiaie Messina
2	<i>discretizzazione per calcolo</i>	<i>variabile (-10 m da p.c.)</i>	2	depositi alluvionali/ sabbie e ghiaie Messina
3	<i>profondità massimo abbattimento falda</i>	<i>variabile (-15 nella zona torri)</i>	3	depositi alluvionali/ sabbie e ghiaie Messina
4	<i>discretizzazione per calcolo</i>	<i>variabile (-25 nella zona torri)</i>	4	depositi alluvionali/ sabbie e ghiaie Messina
5	<i>contatto alluvioni-sabbie e ghiaie di Messina</i>	<i>variabile (-35 nella zona torri)</i>	5	sabbie e ghiaie di Messina
6	<i>profondità zona jet grouting</i>	<i>Variabile (-38.5 nella zona torri)</i>	6	sabbie e ghiaie di Messina
7	<i>discretizzazione per calcolo</i>	-50	7	sabbie e ghiaie di Messina
8	<i>discretizzazione per calcolo</i>	-75	8	sabbie e ghiaie di Messina
9	<i>discretizzazione per calcolo</i>	-100	9	sabbie e ghiaie di Messina
10	<i>discretizzazione per calcolo</i>	-125	10	sabbie e ghiaie di Messina
11	<i>bottom modello</i>	-150		

Tabella 1. Discretizzazione verticale del dominio ampio (la dicitura “variabile” riferita alle slices è dovuta al fatto che dove la slice incontra elementi morfologici, es. fondo dei Pantani, la su superficie si può deformare).

Sono state inserite 11 *slices* (partizioni) che delimitano 10 *layers*, il cui significato e le cui caratteristiche sono riassunte in Tabella 1.

In Figura 5 è riportata un’immagine tridimensionale della *mesh*, ottenuta con esagerazione verticale 2:1 per una migliore visualizzazione.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

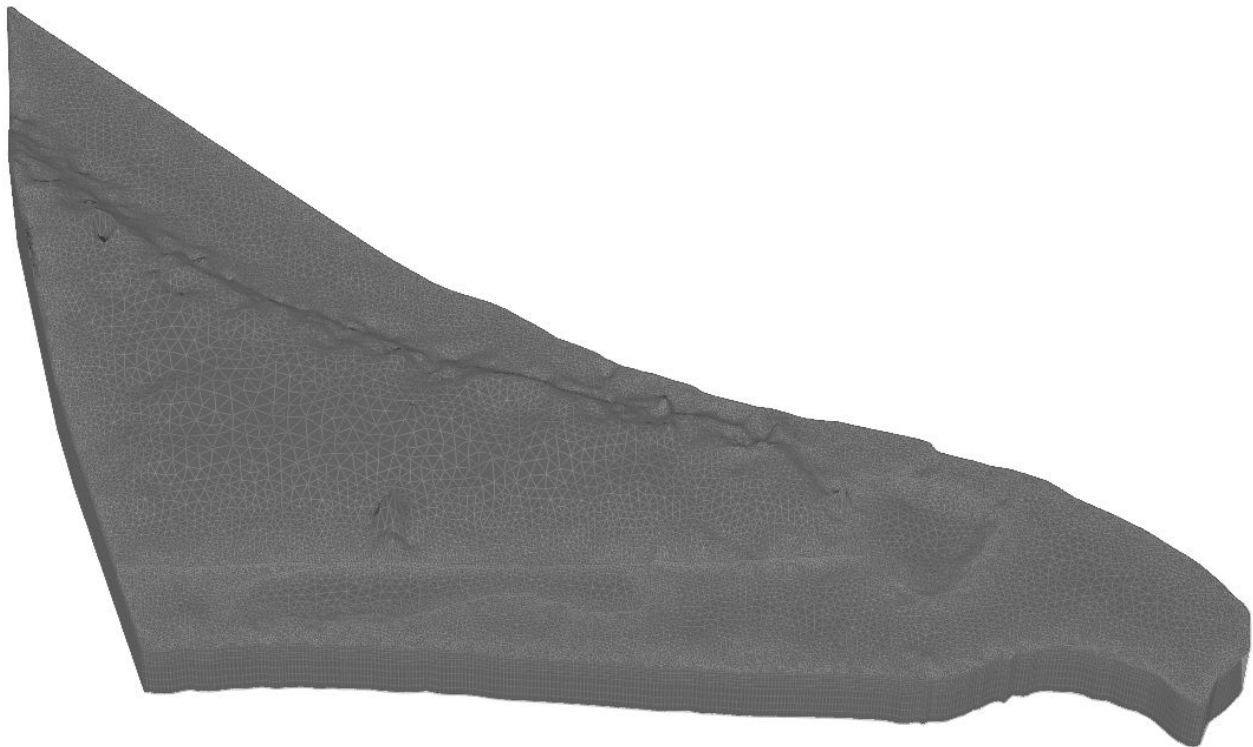


Figura 5. Visualizzazione tridimensionale della mesh del dominio ampio (esagerazione verticale 2:1).

4.4.1.4 Parametrizzazione delle unità idrogeologiche

A partire dal modello idrogeologico concettuale, nel modello numerico si è scelto di rappresentare le seguenti unità idrogeologiche, parametrizzandole nel modo seguente:

- depositi alluvionali recenti e attuali: laddove affioranti, sono stati rappresentati con uno spessore variabile da 30 a 40 m a seconda del contesto topografico, una conducibilità idraulica isotropa di $5 \cdot 10^{-4}$ m/s, compatibile con i valori determinati per questi litotipi (cfr. paragrafo 3.3), ed una porosità del 30%;
- formazione delle sabbie e ghiaie di Messina: rappresentano l'unità idrogeologica prevalente nel dominio; esse sono state rappresentate con una conducibilità idraulica pari a $1 \cdot 10^{-5}$ m/s, valore compatibile con il processo di calibrazione (sono stati vagliati tutti gli ordini di grandezza compresi tra 10^{-3} e 10^{-7} m/s) e con i dati di prove idrauliche eseguite nei piezometri di recente realizzazione (vedi seguito), una porosità efficace del 20% ed hanno uno spessore variabile che raggiunge i 150 metri circa;

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

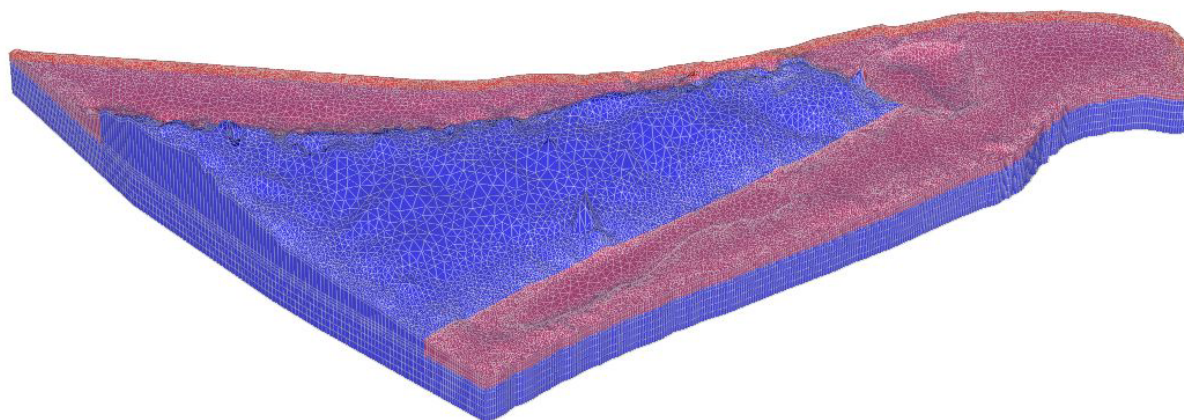
La base del modello è stata posta a 150m di quota anche sulla scorta della realizzazione di un precedente modello spinto fino ad una profondità di 250m a raggiungere il tetto di un acquiclude rappresentato dalla Formazione di San Pier Niceto argillosa. Tale modello preliminare ha permesso di accertare che già alla profondità di 150m il flusso e gli scambi tra layers erano molto ridotti. Per tale ragione si è preferito tagliare il modello definitivo a un livello più superficiale e raffinare il reticolo di elementi finiti inserendo un maggior numero di slices a minori profondità.

In Figura 6 sono illustrate alcune viste tridimensionali della distribuzione delle conducibilità idrauliche visualizzate con esagerazione verticale 2:1.

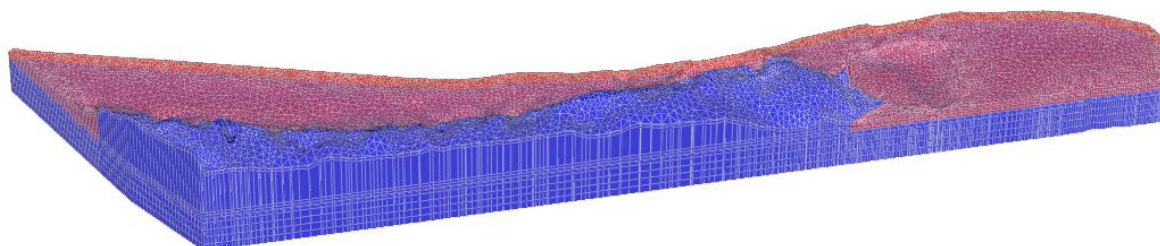
Merita un commento specifico il valore di conducibilità idraulica adottato per le sabbie e ghiaie di Messina che è di $1 \cdot 10^{-5}$ m/s. Questo valore è inferiore a quelli riportati dalla relazione idrogeologica generale di progetto, ma la sua scelta deriva da una serie di tentativi di calibrazione, a valle dei quali si è concluso che valori di permeabilità maggiori in questo settore delle ghiaie e sabbie di Messina non possono essere realistici perché non consentono in alcun modo di raggiungere calibrations soddisfacenti della piezometria con i bassi valori di infiltrazione efficace riportati nello studio idrogeologico generale. Anche il solo incremento di mezzo ordine di grandezza rispetto a questo valore determina dei notevoli stravolgimenti della geometria delle isopieze con scostamenti considerevoli rispetto alla situazione reale desumibile dalle carte idrogeologiche degli studi generali con forte appiattimento dei carichi idraulici.

A valle dei vari tentativi di calibrazione si è quindi dovuto concludere che con molta probabilità il valore di permeabilità adottato per le ghiaie e sabbie di Messina è quello più verosimile per il settore del Capo Peloro. Questo fatto in qualche modo rappresenta già un output del modello che peraltro sembra coerente con due aspetti non trascurabili: i) dalla relazione geologica di progetto si evince che i fenomeni di cementazione nelle ghiaie e sabbie di Messina sono molto diffusi nell'area del capo, il che in qualche modo costituisce una peculiarità rispetto al resto dell'areale di affioramento; ii) le prove di permeabilità eseguite nella zona dei Pantani hanno effettivamente restituito permeabilità piuttosto basse, perlopiù comprese tra $5 \cdot 10^{-5}$ e $5 \cdot 10^{-6}$ m/s (cfr. Figura 7).

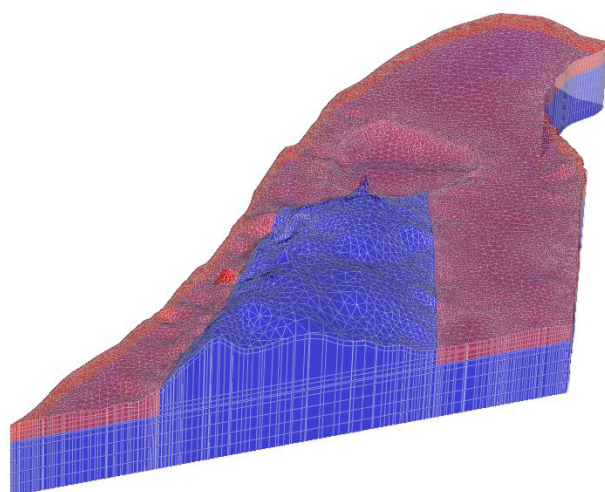
		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	



a)



b)



c)

Figura 6. Visualizzazione tridimensionale delle unità idrogeologiche rappresentate: in rosso i depositi alluvionali; in azzurro le sabbie e ghiaie di Messina (esagerazione verticale 2:1).

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

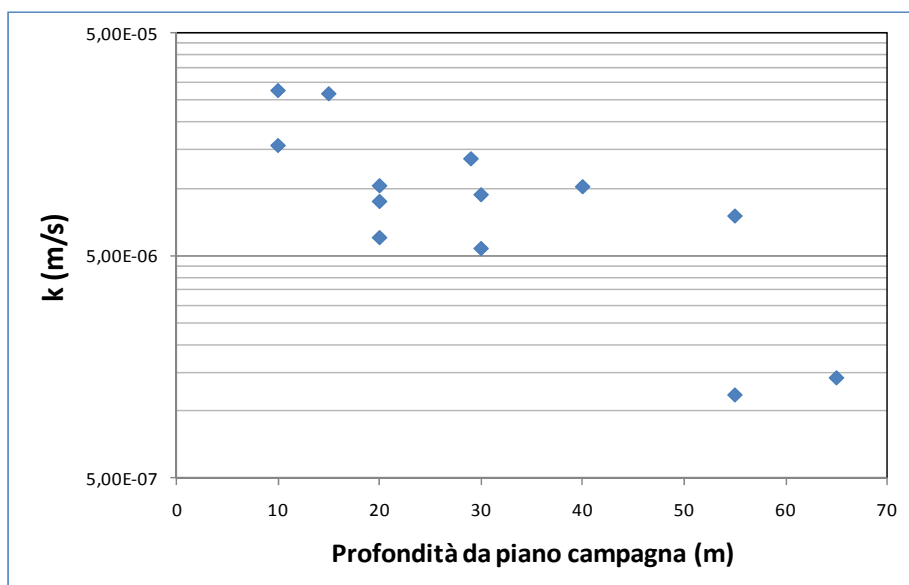


Figura 7. Diagramma che riassume i dati di conducibilità idraulica desunti dalle prove in foro realizzate nella zona dei Pantani nel corso della campagna di indagini 2010.

4.4.1.5 Condizioni al contorno

La risoluzione delle equazioni di flusso all'interno del dominio modellizzato ha richiesto la definizione delle condizioni al contorno, ossia dei flussi o dei carichi piezometrici sui confini del dominio. La scelta delle condizioni al contorno è una fase critica nella costruzione di un modello, poiché esse preconditionano fortemente la rete di flusso calcolata dal codice numerico (Anderson & Woessner, 1991). Per questo motivo è meglio un confine "teorico" sufficientemente distante piuttosto che un confine vicino al sito di cui non si ha certezza.

A tutto il contorno del dominio coincidente con la linea di costa è stato fissato il carico piezometrico pari a 0 m s.l.m. (Figura 8). In questo caso per carico si intende il carico piezometrico assoluto, che però nel modello è stato inserito come carico equivalente d'acqua dolce. Tale carico a quote inferiori a 0 m s.l.m., aumenta in funzione della profondità secondo la formula $h_{eq} = - 0.245 \cdot z$ (Diersch, 2006).

Al limite ovest è stato assegnato un flusso entrante applicato ai nodi di tutte le *slices* ad eccezione della prima e dell'ultima (Figura 8); il valore applicato ad ogni nodo è pari a $5.5 \cdot 10^{-4}$ m/g (metri al giorno) e dà luogo ad un flusso entrante totale pari a 200 m³/g (2.31 l/s).

La ricarica del dominio per infiltrazione efficace delle acque piovane (ricarica diretta o zenitale, che rappresenta l'acqua che effettivamente raggiunge la tavola d'acqua, al netto dell'evapotraspirazione reale e dell'immagazzinamento nel suolo) è stata simulata come un confine

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

a flusso imposto (condizione di Neumann o del 2° tipo) assegnata alla prima *slice*. Essa è stata determinata attraverso il processo di calibrazione ed è pari a 90 mm/anno, assegnato uniformemente su tutto il dominio per semplificare. Questo valore, apparentemente elevato per queste zone, deve essere considerato come un valore mediato sul dominio, che nella realtà è comprensivo delle infiltrazioni localizzate lungo gli alvei fluviali incisi.

In un modello a densità variabile, oltre alle condizioni al contorno e condizioni interne relative al flusso, vanno considerate quelle relative al trasporto, ossia oltre ai carichi e/o flussi, occorre definire le concentrazioni entranti/uscenti dal dominio.

Questo è relativamente semplice lungo la linea di costa, che rappresenta un confine a carico imposto (il livello del mare) e salinità nota e dove la zona di transizione tra acqua dolce e acqua salata rappresenta l'equilibrio tra il flusso d'acqua dolce dall'acquifero verso il mare e l'acqua salata del mare.

A tutta la linea di costa è stata assegnata una concentrazione fissa a 35.000 g/m³ (o mg/l) (espressa come TDS, ossia solidi totali disciolti), applicata in modo tale che l'acqua in ingresso al dominio dal mare sia vincolata a quel valore, mentre l'acqua in uscita dal dominio possa avere valori inferiori-uguali a quello imposto.

Al flusso in entrata dal lato ovest ed alla ricarica zenitale sono state abbinate concentrazioni pari a 3.000 g/m³ a rappresentare acque a bassissima salinità (se confrontata con i 35000 g/m³ dell'acqua di mare). Questo valore di salinità è stato scelto compatibilmente con i log di conducibilità disponibili per le acque presenti nel sistema di flusso al di sotto della dorsale spartiacque tirrenico-ionica, che non debbono differire di molto da quelle entranti dal bordo ovest del modello.

Alla ricarica è stato assegnato un flusso di massa pari a 0.13 g/m³/giorno sulla dorsale spartiacque e di 0,001 g/m³/giorno sulla zona della piana costiera. Questa differenza di salinità è stata introdotta per tenere in conto l'esistenza di tempi di interazione acqua/roccia molto più prolungati sotto la dorsale spartiacque, dove la permeabilità è molto bassa e le acque si spostano molto lentamente, peraltro anche attraverso una potente sona insatura. Si è dunque ipotizzato che ciò origini delle acque di falda più mineralizzate. Nei depositi alluvionali costieri invece il flusso è molto rapido e i tempi di interazione acqua – roccia più brevi, con conseguente minor mineralizzazione

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Rev</i></th> <th><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

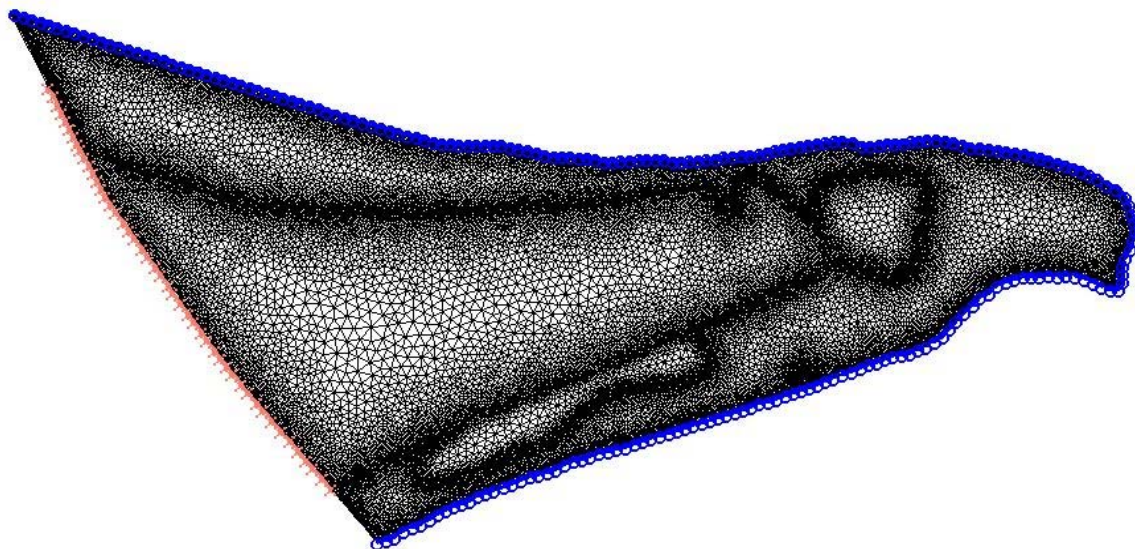


Figura 8. Visualizzazione delle condizioni al contorno applicate ai confini del dominio: con i circoletti blu è rappresentata la condizione del 1° tipo, applicata a tutte le slices; con le crocette rosa la condizione del 2° tipo applicata alle slices da 2 a 11; a tutti gli elementi del primo layer è assegnato un flusso in entrata dall'alto per ricarica zenitale.

4.4.1.6 Condizioni interne

Le uniche condizioni interne sono rappresentate dai Pantani. È importante precisare che i Pantani costituiscono condizioni al contorno (anche se interne al dominio) per le acque sotterranee, che sono l'oggetto della modellazione numerica, in quanto FeFlow risolve le equazioni di flusso nelle acque sotterranee e non nei corpi di acqua superficiale. Per cui i Pantani sono simulati sulla base del modello concettuale disponibile e nelle simulazioni in corso d'opera e post-operam viene valutato l'effetto di richiamo della falda sui Pantani osservando i dati del bilancio di flusso e delle deformazioni piezometriche.

Essi sono stati rappresentati con una condizione del 3° tipo, che simula un trasferimento di flusso da falda a specchio d'acqua (o viceversa) come funzione della differenza tra il carico idrometrico del lago (fissato a 0 m s.l.m.) ed il carico piezometrico della falda (calcolato dal modello). Questa condizione permette di derivare dalla calibrazione del modello la relazione falda/pantani ed i flussi di scambio.

Su tutti i nodi ricadenti sugli areali dei Pantani è stata impostata inoltre una concentrazione di sale, espresso come TDS, pari a 31.000 e 33.000 g/m³, rispettivamente per il Pantano Grande (ovest) ed il Pantano Piccolo (est), valori medi di variabilità desunti da Abbruzzese & Genovese (1952).

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

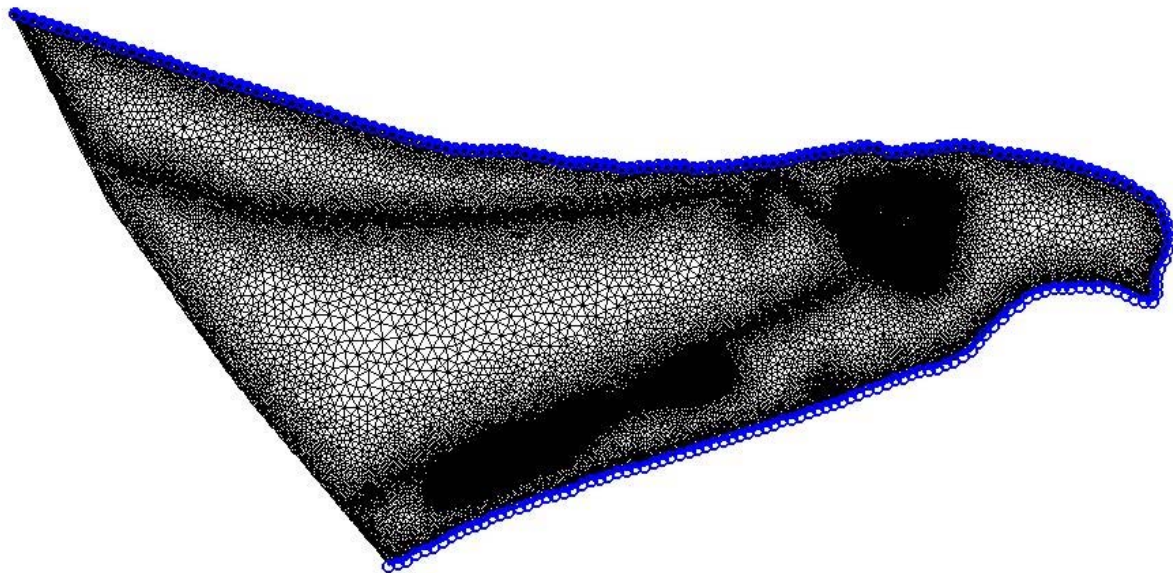


Figura 9. Visualizzazione delle condizioni al contorno applicate ai nodi della *slice* 1: con i circoletti blu è rappresentata la condizione del 1° tipo (di cui al capitolo precedente); con i circoletti neri la condizione del 3° tipo applicata a tutti i nodi dei Pantani solamente sulla prima *slice*).

4.4.1.7 Calibrazione della piezometria di riferimento e considerazioni sul bilancio idrologico e idrogeologico dei Pantani

La piezometria calcolata dal codice di calcolo sul dominio di modellazione è presentata in Figura 10, sovrapposta per confronto alla piezometria di riferimento. Considerati i bassi gradienti piezometrici, tipici di acquiferi di piana costiera, il livello di calibrazione qualitativa è buono.

Bisogna precisare che non sono stati considerati eventuali emungimenti di acque sotterranee da pozzi, per l'aleatorietà dei dati relativi a questo aspetto, che potrebbero essere la causa delle leggere deformazioni delle isopieze in alcune zone. Va inoltre considerato che durante la procedura di calibrazione si è scelto di agire sui valori delle conducibilità idrauliche mantenendoli sempre costanti all'interno delle singole unità idrogeologiche, al fine di non inserire complicazioni di cui poi in fase di elaborazione è difficile avere un controllo; nella realtà esisteranno sicuramente variazioni di conducibilità, che possono contribuire a deformazioni locali della piezometria.

A dimostrare il grado comunque soddisfacente di calibrazione raggiunto viene presentata una valutazione quantitativa, basata sul confronto tra i carichi piezometrici osservati ai pozzi ed i carichi calcolati dal modello sugli stessi punti (Figura 11); in Tabella 2 sono riassunti i principali parametri statistici di calibrazione.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

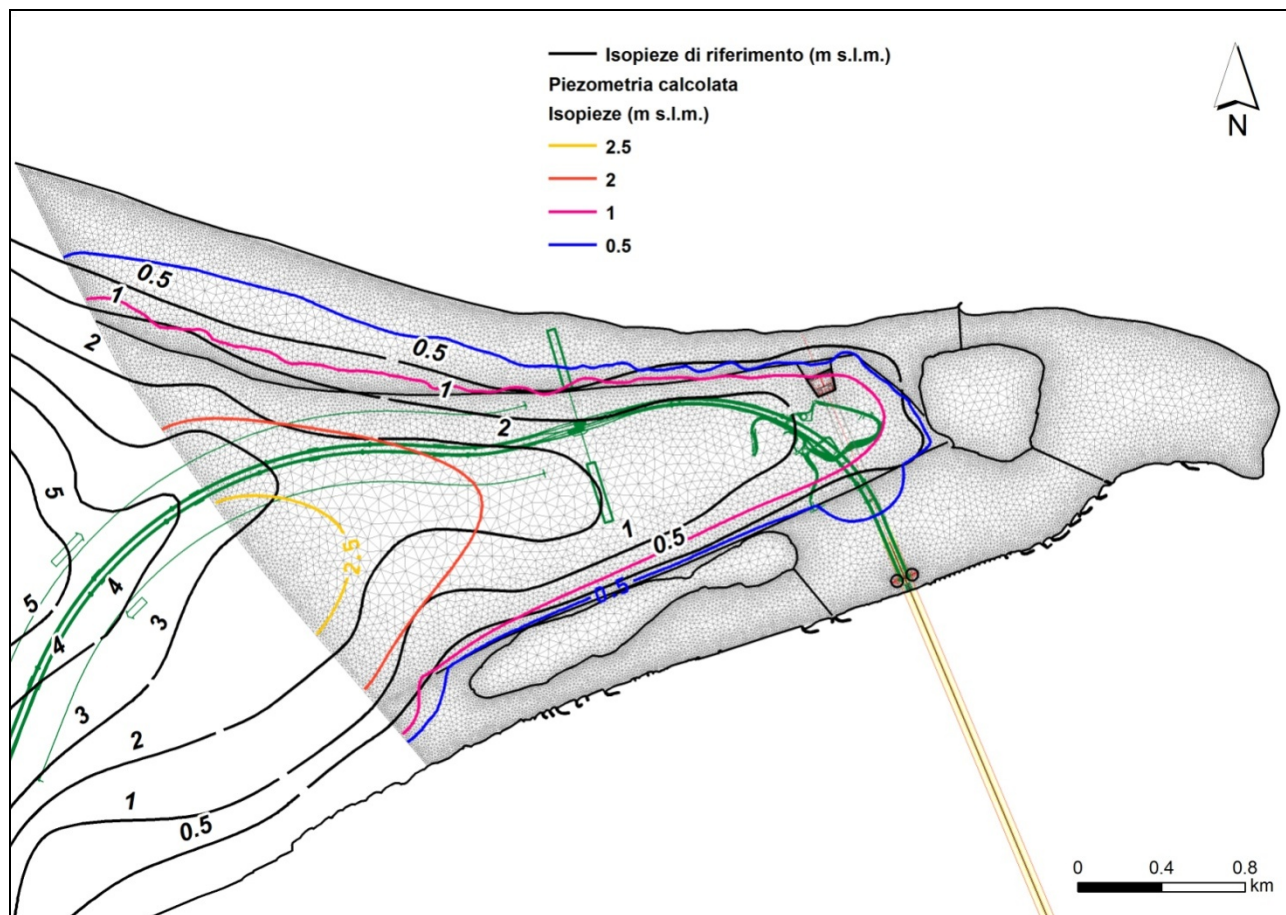


Figura 10. Calibrazione qualitativa della piezometria di riferimento.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

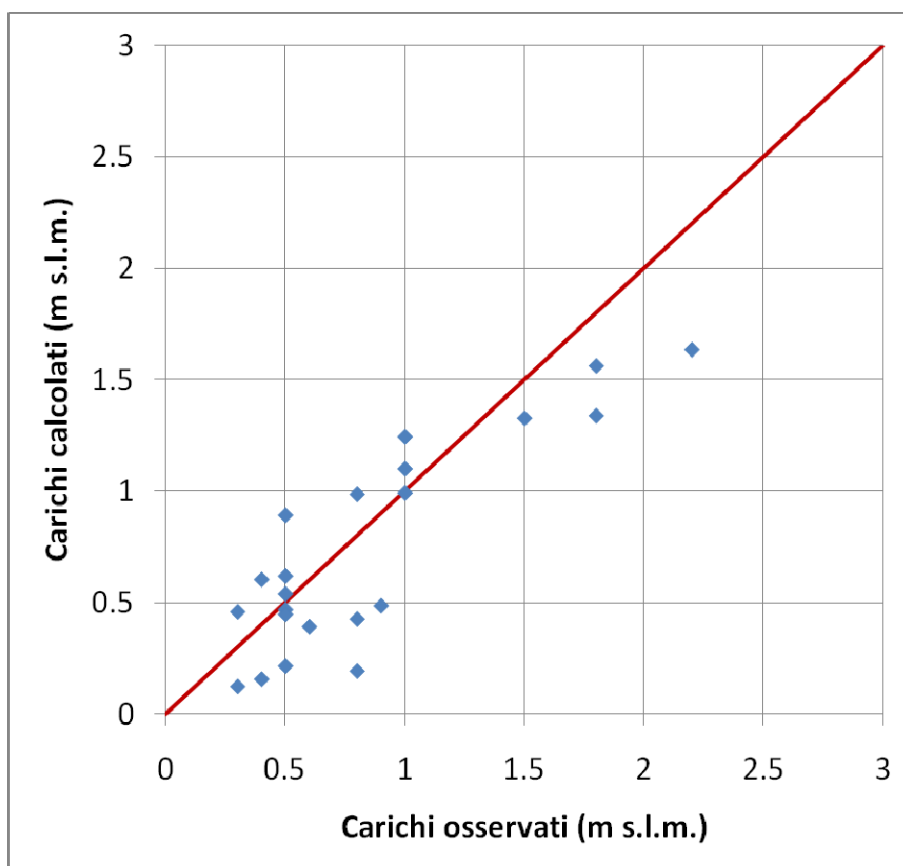


Figura 11. Calibrazione quantitativa della piezometria di riferimento: diagramma a dispersione dei carichi piezometrici ai punti di osservazione di Figura 2.

Massimo carico osservato	2.2
Minimo carico osservato	0.3
Media dei residui (m)	-0.10869
Media assoluta dei residui (m)	0.239933
Scarto quadratico medio (m)	0.272505
Scarto quadratico medio normalizzato (%)	14.34%

Tabella 2. Parametri statistici della calibrazione quantitativa dei carichi piezometrici.

Dal modello calibrato è stato estratto il bilancio di massa, che viene sinteticamente presentato in Tabella 3, espresso sia in m³/giorno che in l/s: esso è rappresentativo delle condizioni naturali e dipende sostanzialmente dalle condizioni al contorno e dalle permeabilità dell'acquifero.

Il bilancio complessivo ossia il valore di entrate e uscite dalla falda, del dominio modellizzato è di circa 179 l/s. Trattandosi di un sistema costiero risulta che per buona parte il bilancio è determinato dalle relazioni con il mare: flusso di acqua dolce uscente dalla falda e flusso di acqua salata

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

entrante nella falda danno un valore netto uscente a mare pari a 5.7 l/s, a testimoniare il raggiungimento di uno stato pseudo-stazionario e di buona calibrazione da parte del modello. Risulta invece maggiore lo scarico del sistema di flusso sotterraneo verso i Pantani che ricevono acqua dall'acquifero per un totale di circa 17,6 l/s, contro una ricarica zenitale (infiltrazione efficace) di 22.18 l/s ed un modesto flusso da ovest (implementato per rendere la particolare morfologia piezometrica sul dominio e per considerare l'estensione dell'acquifero verso monte in quella direzione) di 2.3 l/s.

Si sottolinea come i valori di flusso siano piuttosto bassi, sia per i ridotti gradienti piezometrici, che per le ridotte permeabilità delle sabbie e ghiaie di Messina.

Condizione al contorno Unità di misura	IN(+) m3/g	OUT(-) m3/g	IN(+) l/s	OUT(-) l/s	Netto l/s
Condizione 1°tipo - limite mare	1.34E+04	-1.39E+04	154.72	-160.44	-5.71
Condizione 2°tipo - ricarica da O	1.99E+02	-1.04E-02	2.31	0.00	2.31
Condizione 3°tipo - Pantani	1.86E+01	-1.54E+03	0.21	-17.84	-17.62
Pantano Grande	1.22E+00	-1.04E+03	0.01	-12.05	-12.03
Pantano Piccolo	1.73E+01	-5.00E+02	0.20	-5.79	-5.59
Condizione 4°tipo	0.00E+00	0.00E+00	0.00	0.00	0.00
Ricarica zenitale	1.92E+03	0.00E+00	22.18	0.00	22.18
Totale	1.55E+04	-1.54E+04	179.42	-178.27	1.15

Tabella 3. Bilancio di massa del dominio nelle condizioni naturali.

Vale la pena fare alcuni commenti sul significato del precedente bilancio idrogeologico soprattutto per quanto attiene ai Pantani. L'alimentazione che i Pantani ricevono dalla falda, sebbene possa essere considerata molto ridotta, deve essere in qualche modo smaltita dai laghi. Sostanzialmente esistono due soli meccanismi che possono consentire lo smaltimento di questa alimentazione, ovverosia (i) il deflusso verso mare attraverso i canali (cfr. § 3.1), oppure (ii) l'evaporazione. Tuttavia poiché sulla base delle informazioni raccolte in sito il deflusso di acqua dai Pantani verso mare risulta subordinato e comunque solo saltuario, appare verosimile che la maggior parte dell'alimentazione da falda venga smaltita dal meccanismo evaporativo. Per verificare se i valori di calibrazione del deflusso in falda sono ragionevoli, ovverosia se essi sono comparabili con i valori di evapotraspirazione, confermando quindi le assunzioni geologiche e idrogeologiche fatte, è stata eseguita una valutazione di massima del valore di evaporazione dai laghi attraverso la formula proposta da Visentini (1937):

$$E_m = 2.25 * T_m^{1.5}$$

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

dove E_m è l'evaporazione media mensile (mm/mese) e T_m è la temperatura media mensile.

Sulla base della formula sono stati innanzitutto calcolati i valori di evaporazione assoluti in termini di altezza di colonna d'acqua evaporata. Per eseguire il calcolo sono stati utilizzati dati di temperatura e precipitazioni derivati dal PAI (Piano Assetto Idrogeologico) per la zona di Messina, peraltro compatibili con quelli utilizzati dal Prof. Ferrara nell'ambito del calcolo SINTACS. I risultati sono riportati nella tabella seguente.

Mese	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ANNO
<i>Temperatura media mensile (stazione Ganzirri 1965-1994)</i>	12,6	12,4	13,4	15,2	18,4	22,1	25,2	26	23,7	20,4	16,9	14	
<i>Evaporazione secondo Visentini</i>	101	98	110	133	178	234	285	298	260	207	156	118	2178
<i>Precipitazione (stazione Ganzirri 1965-1994)</i>	97,4	83,8	71,9	52,4	26,6	14,4	12,5	20	54,8	100,2	98	109	740,6

Tabella 4. Temperature medie mensili per la zona dei Pantani e relativa evaporazione calcolata attraverso la formula di Visentini (1937); dati espressi in mm di colonna d'acqua.

Dal momento che l'evaporazione dai laghi, oltre a contribuire allo smaltimento dell'acqua che affluisce ai laghi dalla falda, contribuisce anche allo smaltimento della precipitazione che piove direttamente sui laghi, al fine di valutare se gli arrivi da falda possono essere interamente smaltiti attraverso evaporazione è necessario valutare gli apporti provenienti dalla precipitazione diretta media annua della pioggia sui laghi. A questa precipitazione va poi aggiunto il contributo proveniente dal ruscellamento superficiale (precipitazione indiretta) che affluisce agli specchi d'acqua attraverso fossi e piccoli corsi d'acqua.

La tabella che segue presenta i valori di differenza tra evaporazione (E), precipitazione diretta (Pd) e precipitazione indiretta (Pi). Per il calcolo della precipitazione indiretta si è fatto riferimento ai valori di ruscellamento calcolati dal Prof. Ferrara nell'ambito del calcolo SINTACS.

	Area (m ²)	Evaporazione E (m ³)	Precipitazione diretta Pd (m ³)	Precipitazione indiretta			Bilancio: E-Pd-Pi	
				Ruscellamento (m)	Area (m ²)	Precipitazione indiretta Pi (m ³)	(m ³)	l/s
Pantano Grande	318138	692889	235613	0,09	1300000	117000	-340276	-10,8
Pantano Piccolo	259681	565572	192320	0,09	250000	22500	-350752	-11,1

Tabella 5. Confronto tra l'evaporazione al netto delle precipitazioni e afflussi in falda per i Pantani.

La tabella mostra che per entrambi gli specchi d'acqua il bilancio è negativo ovvero l'evaporazione

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;"><i>Rev</i></td> <td style="width: 50%;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

supera gli apporti delle precipitazioni. I valori ottenuti vanno quindi confrontati con i risultati forniti dal modello numerico in termini di apporti dalla falda, unico elemento non incluso nel precedente bilancio in grado di controbilanciare le perdite evaporative residue. La tabella che segue riporta il confronto tra questi valori.

	Evaporazione netta (l/s)	Afflussi da falda (l/s)
Pantano Grande	10,8	12
Pantano Piccolo	11,1	5,6
Pantani Globale	21,9	17,6

Tabella 6. Confronto tra l'evaporazione al netto delle precipitazioni e gli afflussi da falda per i Pantani.

Dal confronto emerge che per il Pantano Grande gli afflussi da falda compensano le perdite evapotraspirative e rimane una modesta aliquota di afflusso di acqua da falda in eccesso. Tuttavia, se si considerano i margini d'errore nelle stime dei diversi parametri del bilancio idrologico dei Pantani ed anche i margini d'errore del modello, si può ragionevolmente stimare che per il Pantano Grande esiste un sostanziale equilibrio tra apporti da falda ed evaporazione.

Per il Pantano Piccolo le perdite eccedono gli afflussi da falda. Ciò sembrerebbe essere coerente con il fatto che la salinità del Pantano Piccolo è più elevata di quella del Pantano Grande e prossima a quella del mare. Esso riceve quindi probabilmente maggiori apporti di acqua di mare, che compensano gli scompensi del bilancio.

I risultati conseguiti con la modellizzazione sembrerebbero quindi essere coerenti con il contesto naturale degli specchi d'acqua.

In Figura 12 è mostrata una vista tridimensionale della distribuzione dei carichi (intesi come carichi equivalenti d'acqua dolce). In Figura 13 una vista tridimensionale sezionata sulla zona delle torri mostra l'aumento dei carichi con la profondità lungo la linea di costa, trattandosi di simulazioni a densità variabile, in cui il codice lavora con carichi equivalenti d'acqua dolce.

 Stretto di Messina		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

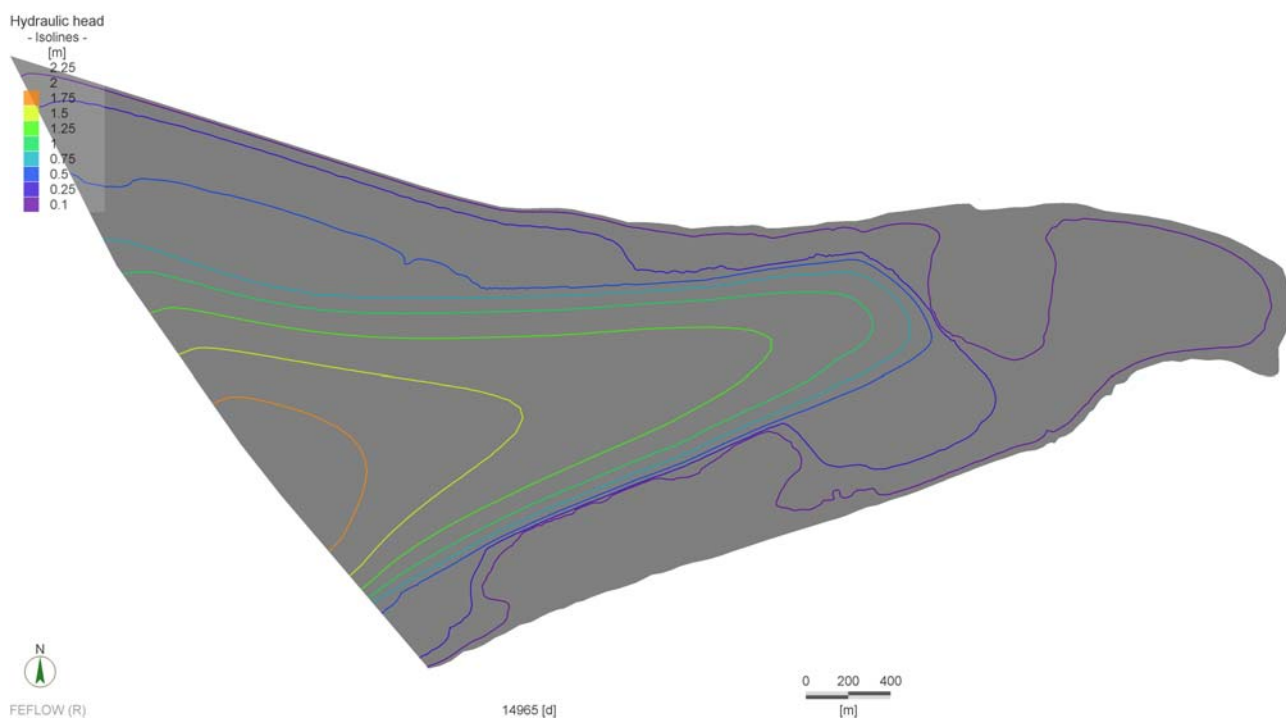


Figura 12. Vista in pianta della distribuzione dei carichi idraulici calcolata nel dominio di flusso.

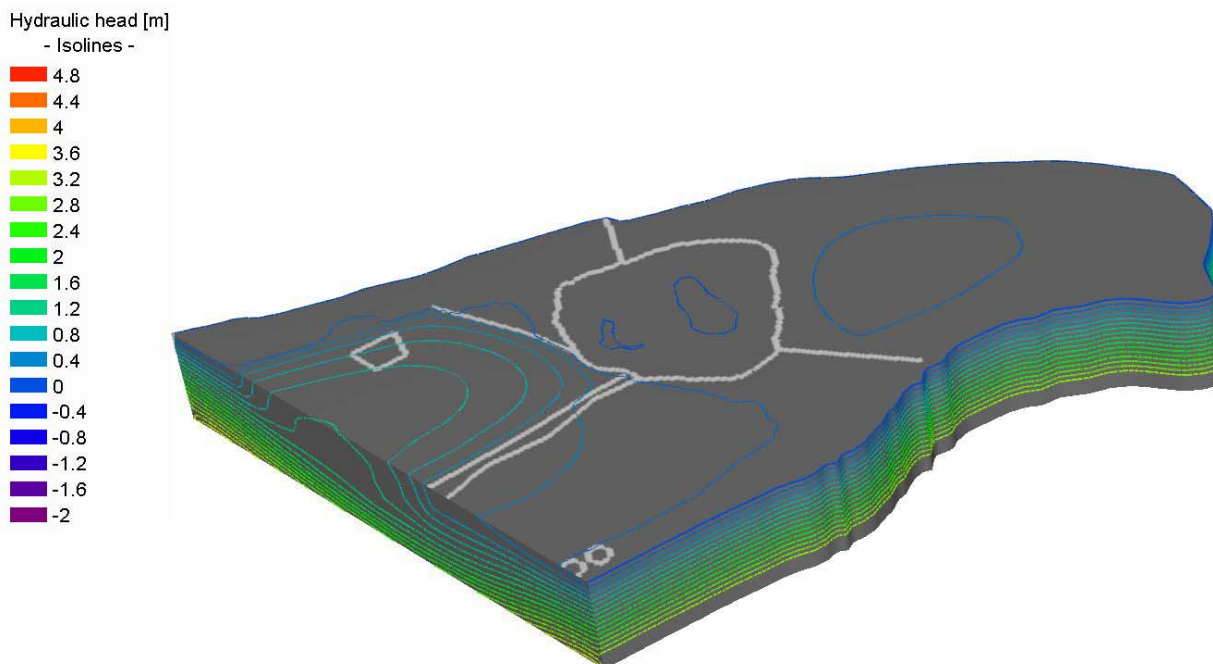


Figura 13. Vista in sezione in corrispondenza delle fondazioni delle torri della distribuzione dei carichi idraulici calcolata nel dominio di flusso (esagerazione verticale 5:1; equidistanza delle isopieze di 0.4 m).

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

4.4.1.8 Calibrazione delle concentrazioni di salinità

In Figura 15 è mostrata una vista tridimensionale della distribuzione delle concentrazioni all'interno del dominio, sezionato lungo la direzione NNO-SSE, dove si può osservare la geometria della zona di transizione acqua dolce-acqua salata sulle due coste ionica e tirrenica.

Il cuneo salino presenta una pendenza debole verso terra su entrambe le coste e riproduce abbastanza fedelmente la geometria osservata attraverso i logs di conducibilità realizzati nei fori piezometrici.

Per valutare lo stato di calibrazione raggiunto con il modello numerico sono stati utilizzati i dati di salinità forniti dal Monitore Ambientale per la zona dei Pantani che presentano una buona distribuzione areale.

La localizzazione dei piezometri disponibili è visualizzata nella pianta schematica di Figura 16. Ai fini della calibrazione, dai dati dei logs di salinità sono stati ricavati valori di salinità medie, associate ai diversi "strati" di acqua: dolce (<5.000 μS), zona di transizione (5.000-22.500 μS) e salata (>22.500 μS).

Per l'acqua dolce, alla quota piezometrica nel punto (in m s.l.m.) è stata associata la salinità dello strato di acqua dolce superficiale, mediando tra i valori che lo rappresentavano.

Relativamente alla zona di transizione acqua dolce-acqua salata, dalla forma del log è stata derivata una quota media della zona di transizione (in m s.l.m.) e ad essa è stato associato un valore di TDS (mg/l).

Relativamente all'acqua salata, alla quota del fondo del piezometro è stata associata la salinità media della colonna di acqua salata (se presente) rappresentativa del cuneo salino, con salinità molto simile all'acqua di mare.

I dati del Monitore Ambientale sono stati prima espressi come $xyzf$ (dove xy sono le coordinate piane, z è la profondità di misurazione della salinità ed f è il valore di salinità) sono stati inseriti nel modello come punti di osservazione e si sono così ottenuti gli scatter plot di confronto tra concentrazioni osservate e concentrazioni calcolate, presentati in Figura 17. Come si può osservare dal diagramma, nonostante una certa dispersione dei punti il modello presenta una discreta calibrazione anche per quanto attiene alla massa.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

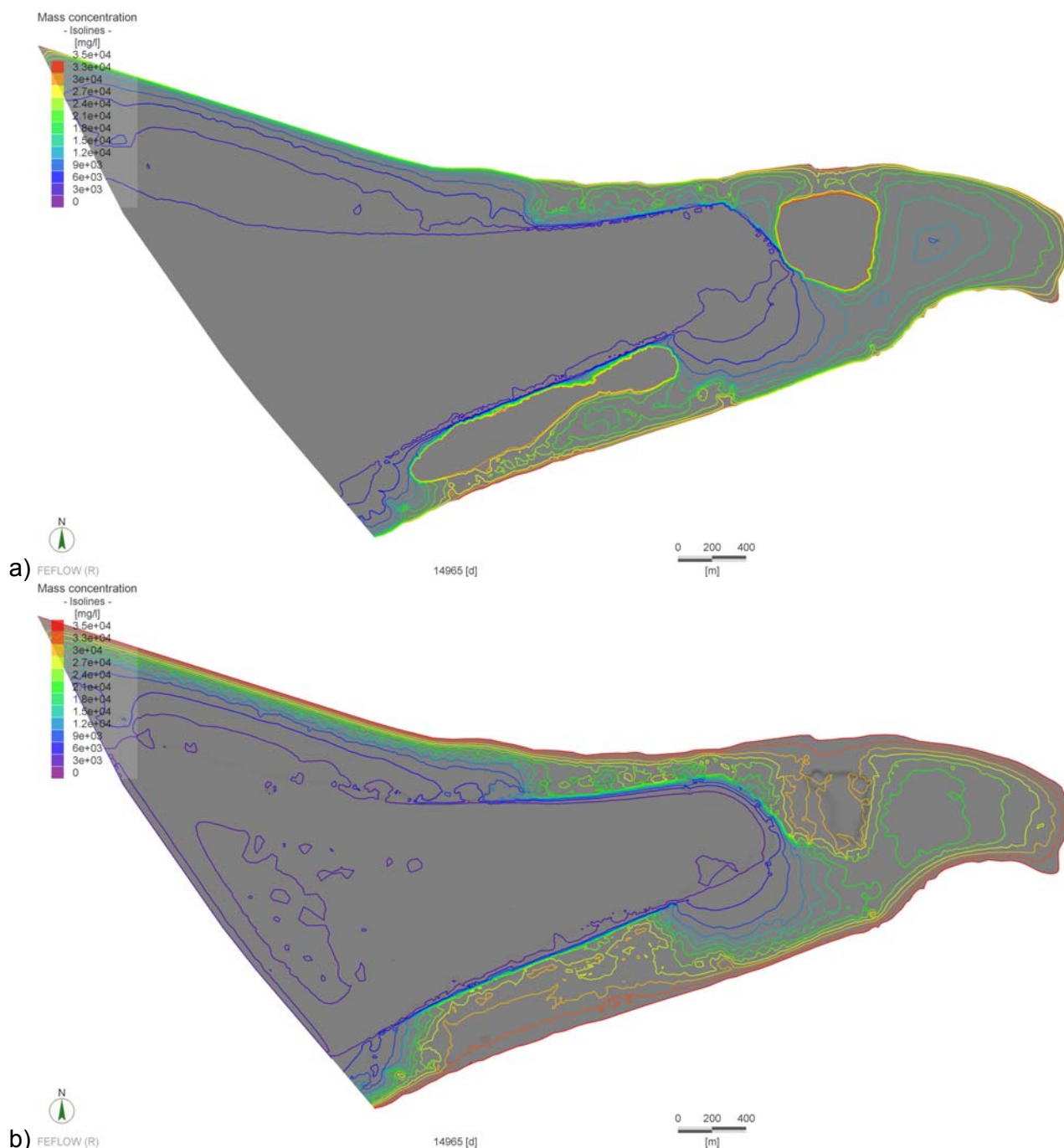


Figura 14. a) Vista in pianta della distribuzione delle concentrazioni saline calcolata flusso sulla slice 1 (che rappresenta la tavola d'acqua); b) vista in pianta della distribuzione delle concentrazioni sulla slice 3 del modello (-15 m s.l.m.).

Va tuttavia chiarito che il diagramma non presenta i punti di calibrazione relativi alle acque dolci superficiali, per le quali il modello fornisce sempre valori di salinità superiori a quelli reali. Ciò è

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

dovuto al fatto che queste acque dolci sono quasi sempre confinate ai primi 2-3m della falda, mentre al di sotto di tale livello la salinità in quasi tutti i casi cresce bruscamente. Il fatto che il modello non calibri questo sottile strato superficiale di acque dolci è stato ritenuto accettabile, poiché l'esigenza di realizzare un calcolo numerico su una zona così vasta come quella in esame non consente di eseguire una discretizzazione per livelli di spessore dell'ordine del metro. In ogni caso, tralasciando il sottile strato di acque dolci superficiali, la cui ridotta salinità nel modello viene necessariamente mediata sul primo layer di spessore di 10m, la calibrazione di massa ottenuta è da considerarsi adatta a descrivere alla scala vasta del modello il fenomeno dell'intrusione salina e le eventuali perturbazioni indotte dall'inserimento delle opere in progetto.

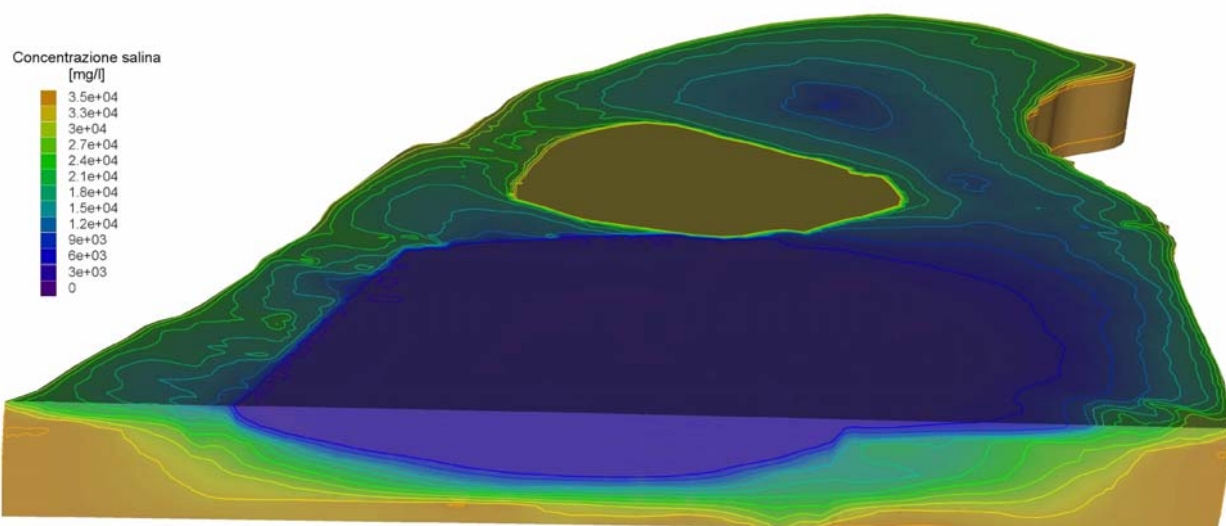


Figura 15. Vista tridimensionale delle concentrazioni sul dominio di calcolo, sezionato lungo la direzione NNE-SSO (esagerazione verticale 2:1).

La Figura 15 permette di osservare come nella zona compresa tra i due Pantani, che è quella più sensibile alle variazioni indotte dalle opere, il modello riproduca un layer superficiale con salinità relativamente ridotte, indicativamente nell'ordine dei 2-10 g/l, che si avvicinano in modo consistente a quanto osservabile nella situazione naturale. Sotto questo primo layer le conducibilità salgono generalmente sopra i 20 g/l, condizione che nuovamente si avvicina in modo consistente alla situazione naturale.

Sotto la dorsale spartiacque compresa tra le due coste tirrenica e ionica il modello riproduce delle salinità dell'ordine dei 2-3 g/l, compatibilmente con i dati dei log realizzati nei sondaggi Eurolink del

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

2010 (unici dati disponibili per questo settore). In questa zona di maggiori carichi di acqua dolce l'interfaccia tra acque bassa salinità e acque ad alta salinità tende ovviamente ad approfondirsi. Sulla costa tirrenica la concentrazione salina è piuttosto elevata fino alla superficie, compatibilmente con i dati forniti dai piezometri..

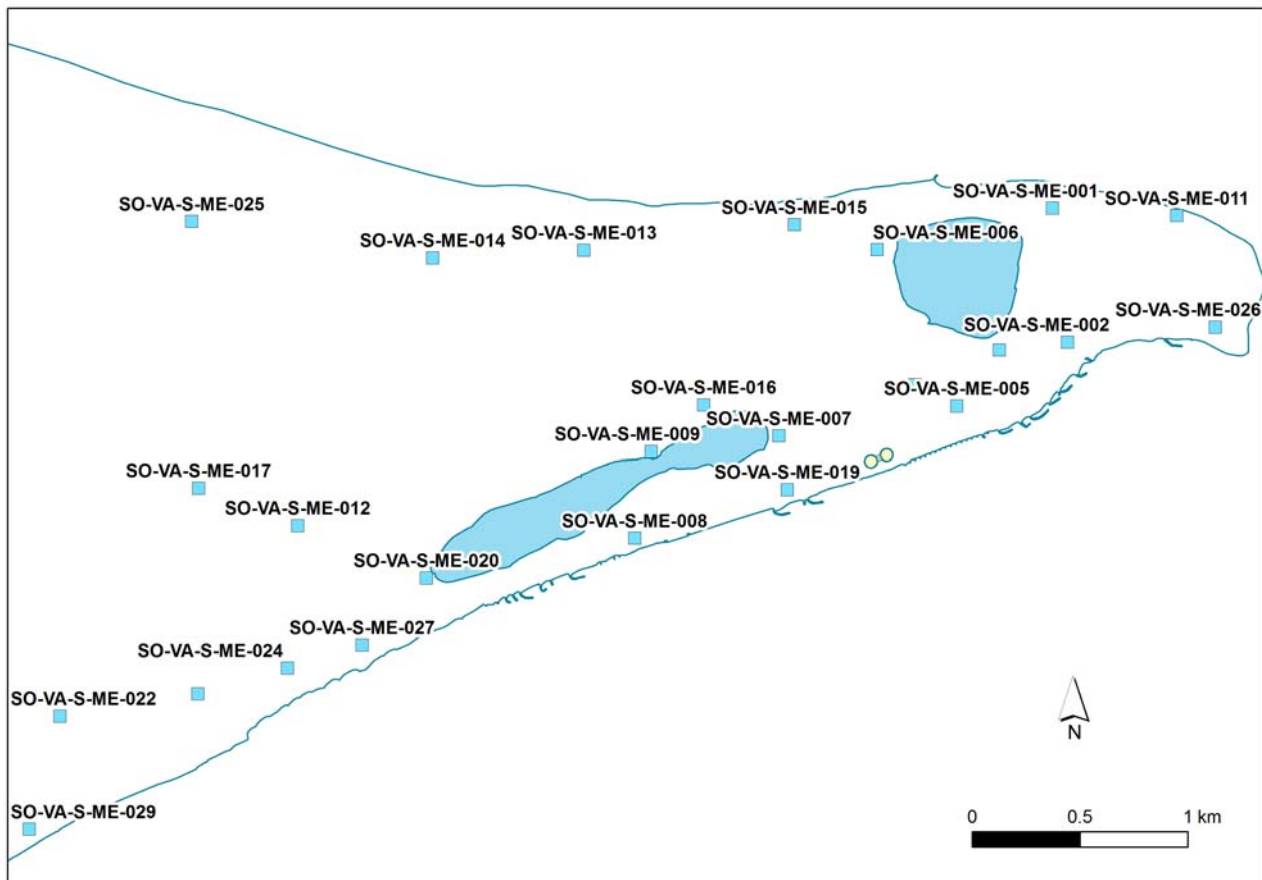


Figura 16. Vista in pianta della distribuzione dei piezometri del monitoraggio ambientale.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

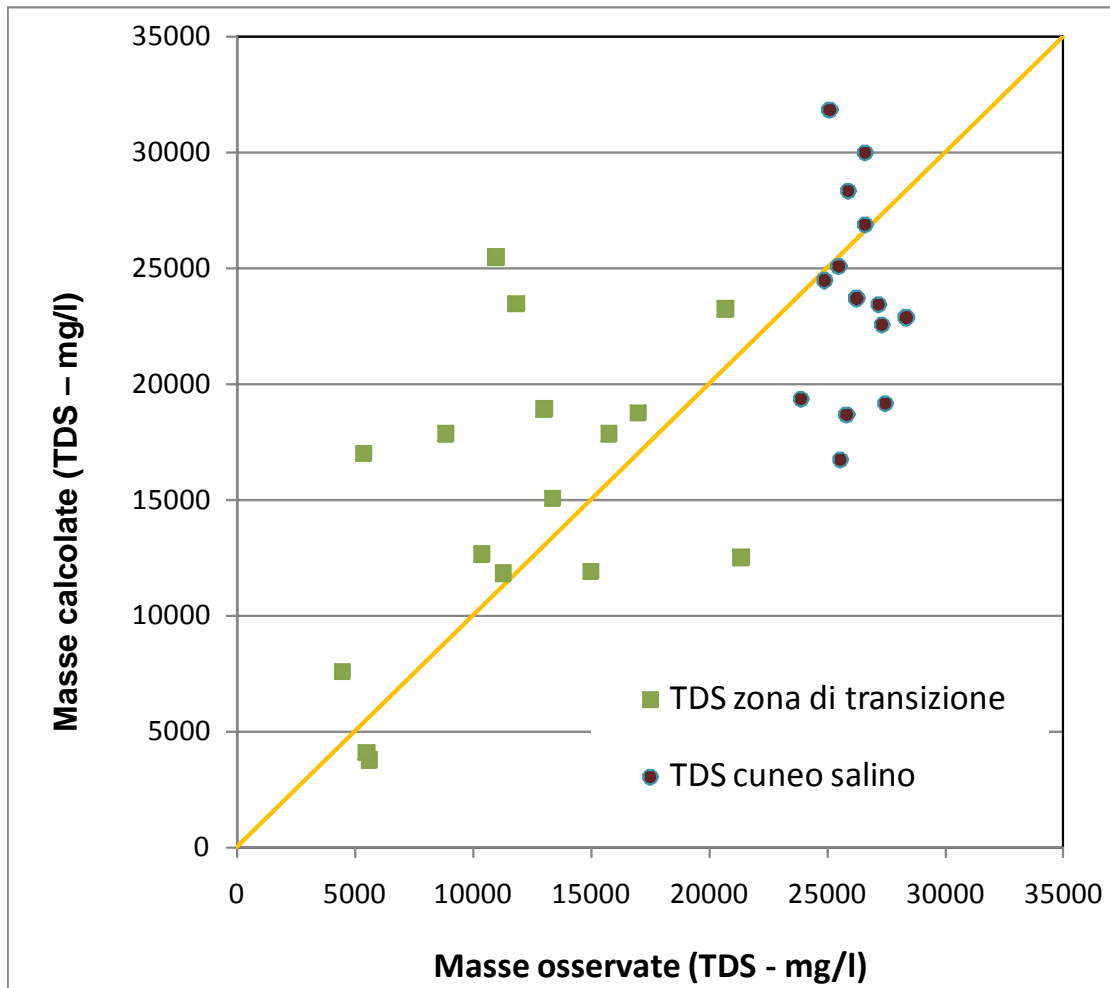


Figura 17. Diagramma a dispersione dei punti di calibrazione della concentrazione salina ottenuto considerando i dati di salinità del monitoraggio ambientale; vengono rappresentati i dati relativi all'intrusione salina e alla zona di transizione verso le acque dolci superficiali; queste ultime non vengono rappresentate per i motivi meglio descritti nel testo.

4.4.2 Modellazione su dominio ristretto

A premessa del commento sulle caratteristiche del dominio ristretto è utile ribadire che l'esigenza di modellizzare su un dominio di dimensioni ridotte sorge per poter ottenere risultati più dettagliati circa le portate estratte dai pozzi di fondazione delle torri. Il dominio ristretto consente infatti di poter eseguire un affinamento molto più spinto delle celle del reticolo di elementi finiti nella zona delle fondazioni, mantenendo i tempi di calcolo entro valori tollerabili (alcune ore), grazie al fatto che tutta la porzione di reticolo del dominio ampio esterna al dominio ristretto viene eliminata.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

4.4.2.1 Definizione del dominio ristretto

La geometria del dominio ristretto è stata definita a partire dai risultati di una prima simulazione di massima estensione del cono di emungimento nel dominio ampio; tali risultati sono più dettagliatamente illustrati al successivo paragrafo. A valle della simulazione preliminare sul dominio ampio si è calcolata la superficie degli isoabbassamenti piezometrici rispetto alla piezometria statica. In sostanza si è simulato sul dominio ampio un pompaggio in corrispondenza delle fondazioni delle torri fino a portare la falda in questo punto alla quota di -15m ca. da piano campagna e successivamente, raggiunto uno stato di equilibrio si è osservata l'estensione del relativo cono di influenza. Il pompaggio nel dominio ampio in questa prima fase è stato simulato senza includere nel modello alcun impedimento al flusso in corrispondenza della zona di pompaggio (assenza dei diaframmi e tamponi); in queste condizioni il cono di influenza ottenuto risulta essere molto più ampio di quello che effettivamente sarà, poiché nella realtà l'emungimento sarà molto limitato e avverrà solo in misura ridotta dal tappo di fondo delle fondazioni. Tale cono risulta però allo stesso tempo sufficientemente cautelativo per poter definire con un certo limite di tolleranza il bordo del dominio ristretto. La scelta di non includere nel modello ampio strutture quali le paratie e il tappo di fondo è congruente con l'esigenza precedentemente citata di mantenere i tempi di modellizzazione al di sotto di valori troppo difficili da gestire.

Il dominio ristretto è stato quindi dimensionato in modo tale da includere la linea di isoabbassamento pari a 0.3 m. La scelta di questo valore si ritiene compatibile con le normali oscillazioni stagionali della falda piezometrica, ma appare anche sufficientemente conservativa, per le ragioni sopra esposte, ossia che l'emungimento simulato nel dominio ampio è stato sovradimensionato e quindi il cono di interferenza reale è molto più ristretto di quello simulato cautelativamente sul dominio ampio.

La geometria del dominio ristretto (Figura 18) è stata definita in modo tale da avere il limite NE parallelo allo spartiacque piezometrico, i limiti O ed E paralleli alle linee di flusso e perpendicolari alla linea di costa (scambio nullo con l'esterno del dominio) oppure allineati lungo i bordi dei Pantani laddove presenti (per tenere in conto possibili trasferimenti Pantani-falda).

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

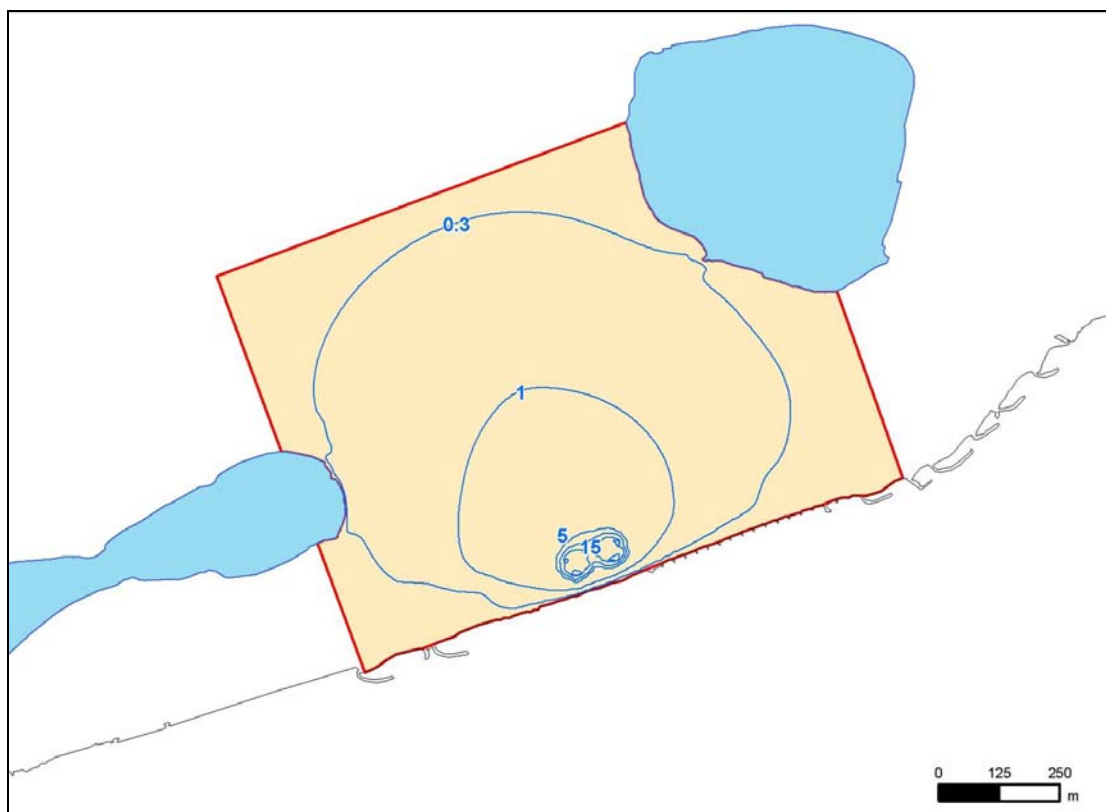


Figura 18. Delimitazione del dominio di flusso ristretto (poligono rosa con contorno rosso) basata sulla carta degli isoabbassamenti (linee blu, unità di misura metri), calcolata sulla base della differenza tra la piezometria statica e la piezometria dinamica nel dominio ampio.

4.4.2.2 **Mesh di calcolo e discretizzazione verticale**

La *mesh* è stata generata tenendo in considerazione le geometrie delle opere in progettazione che possono interagire con la falda idrica sotterranea e che era necessario rappresentare con buon dettaglio nelle simulazioni. Essa è formata da elementi triangolari (in pianta), che, estrusi nella terza dimensione, formano parallelepipedi a base triangolare. Ogni triangolo ha 3 nodi di calcolo ai suoi vertici. E' stata impostata una densità maggiore del reticolo (quindi dimensioni minori dei triangoli e numero maggiore dei nodi di calcolo) nei pressi delle opere di fondazione, lungo la linea di costa e lungo i bordi degli stagni. In Figura 18 e Figura 20 si può osservare la geometria della *mesh*, rispettivamente in pianta ed in vista tridimensionale.

Anche la discretizzazione verticale è stata migliorata rispetto al dominio ampio, al fine di rappresentare le geometrie delle fondazioni e degli elementi di impedimento al flusso. In Tabella 7 è schematicamente illustrata la struttura del dominio sulla verticale.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

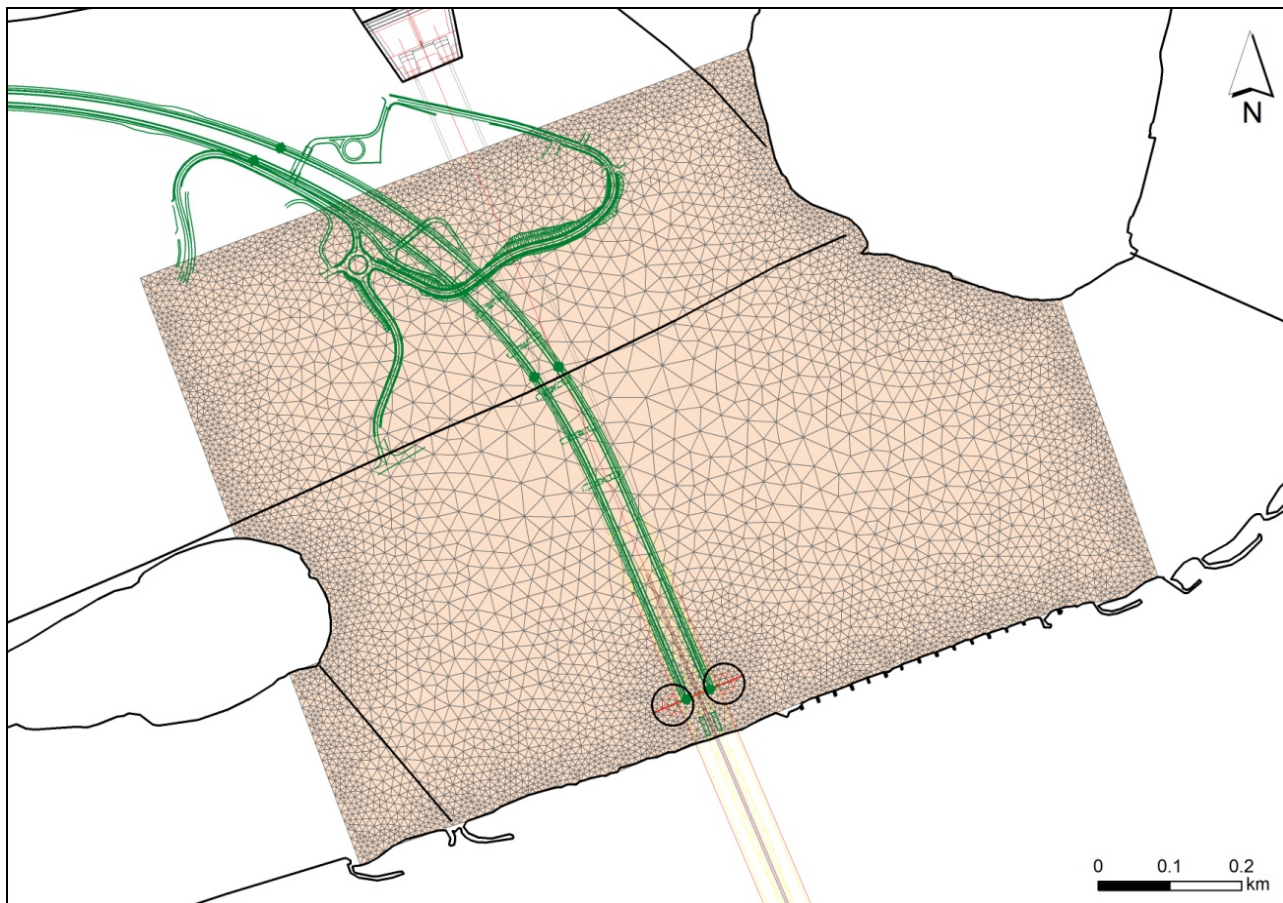


Figura 19. Mesh di calcolo sul dominio ristretto.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Slice	Limite	Quota (m s.l.m.)	Layers	Unità idrogeologica
1	<i>piano campagna</i>	<i>variabile</i>		
			1	depositi alluvionali (o sabbie e ghiaie di Messina) + paratie 10-8 sull'anello esterno
2	<i>Discretizzazione per calcolo</i>	<i>-10 m</i>		
			2	depositi alluvionali (o sabbie e ghiaie di Messina) + paratie 10-8 sull'anello esterno
3	<i>profondità massimo abbattimento falda</i>	<i>-15</i>		
			3	depositi alluvionali (o sabbie e ghiaie di Messina) + paratie 10-8 sull'anello esterno
4	<i>discretizzazione per calcolo</i>	<i>-20</i>		
			4	depositi alluvionali (o sabbie e ghiaie di Messina) + paratie 10-8 sull'anello esterno
5	<i>nuovo contatto alluvioni-sabbie</i>	<i>-35</i>		
			5	sabbie e ghiaie di Messina (con jet grouting) + paratie 10-8 sull'anello esterno
6	<i>fine jet grouting</i>	<i>-38.5</i>		
			6	sabbie e ghiaie di Messina (senza jet grouting)
7	<i>Discretizzazione per calcolo</i>	<i>-45</i>		
			7	sabbie e ghiaie di Messina
8	<i>discretizzazione per calcolo</i>	<i>-50</i>		
			8	sabbie e ghiaie di Messina
9	<i>discretizzazione per calcolo</i>	<i>-75</i>		
			9	sabbie e ghiaie di Messina
10	<i>discretizzazione per calcolo</i>	<i>-100</i>		
			10	sabbie e ghiaie di Messina (o argille basali)
11	<i>bottom modello</i>	<i>-125</i>		

Tabella 7. Discretizzazione verticale nel dominio ristretto; N.B. nei layers 1-4 è riportata la dicitura depositi alluvionali (o sabbie e ghiaie di Messina) perché su questi layers sono presenti dei contatti tra le due unità al limite tra la piana alluvionale e la dorsale montuosa che divide le due coste (depositi alluvionali nelle piane costiere e sabbie e ghiaie di Messina sotto il rilievo).

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Rev</i></th> <th><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

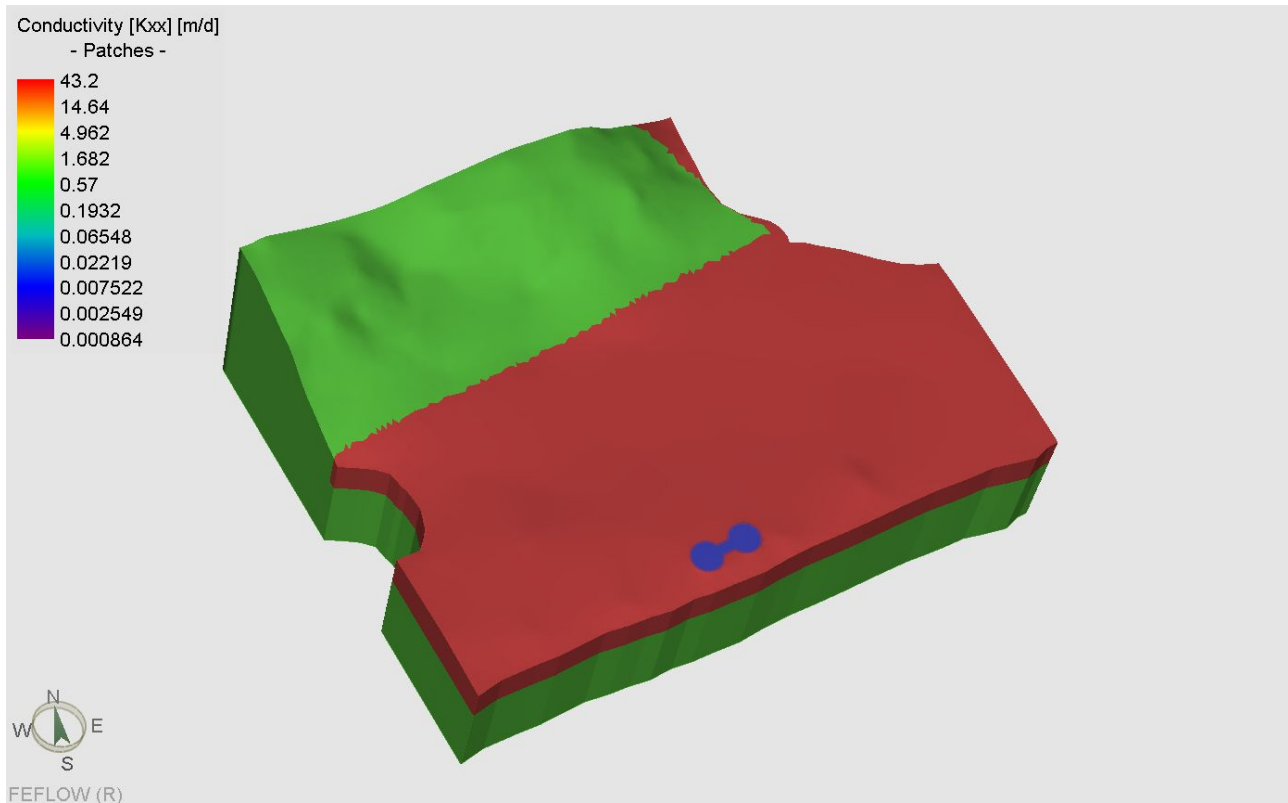


Figura 20. Vista tridimensionale della *mesh* di calcolo e della distribuzione dei parametri sul dominio ristretto.

4.4.2.3 Parametrizzazione delle unità idrogeologiche

La parametrizzazione delle unità idrogeologiche è identica a quella del dominio ampio.

Relativamente alle opere antropiche sono stati assegnati i seguenti parametri:

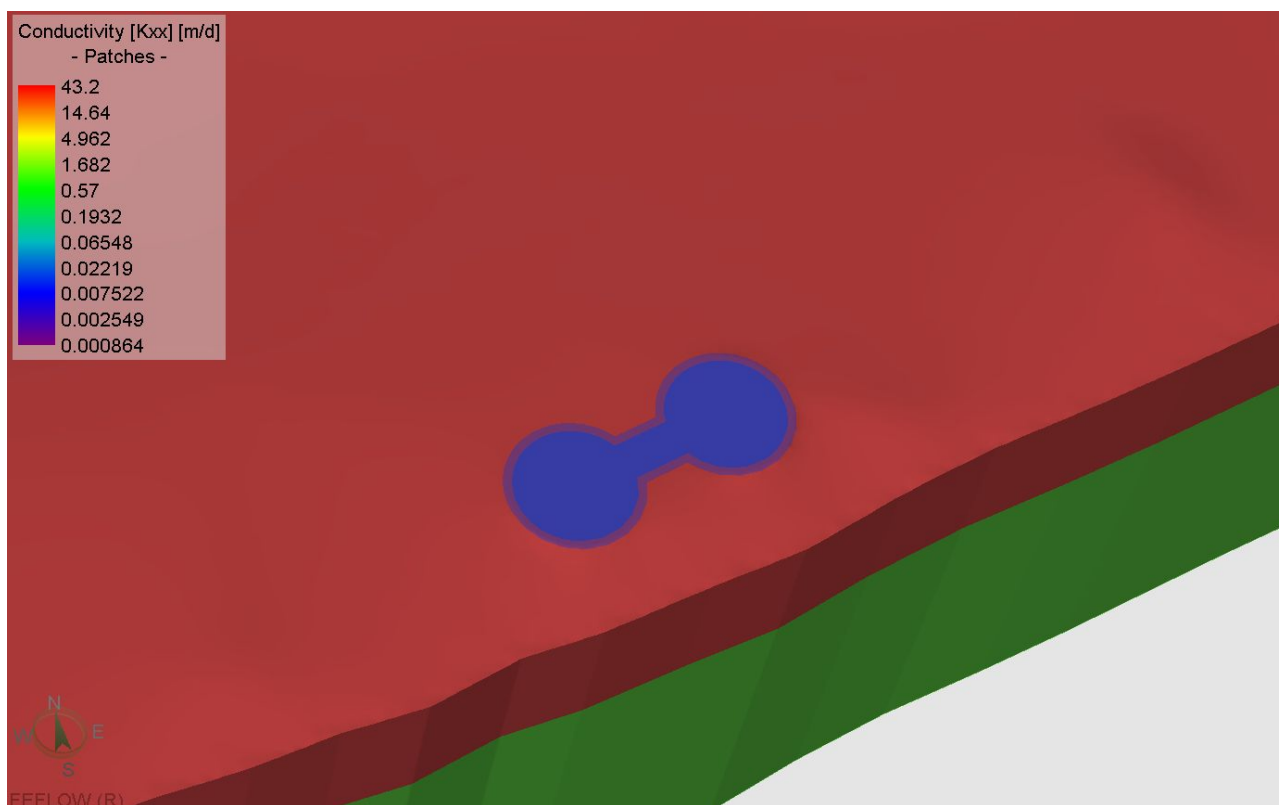
- Paratie: $K 10^{-8}$ m/s; porosità 1%
- Terreno trattato con jet grouting: eseguite tre simulazioni con $K 10^{-6}$, 10^{-7} e 10^{-8} m/s; porosità 10%.

In Figura 21 sono mostrate due visioni tridimensionali della zona delle torri.

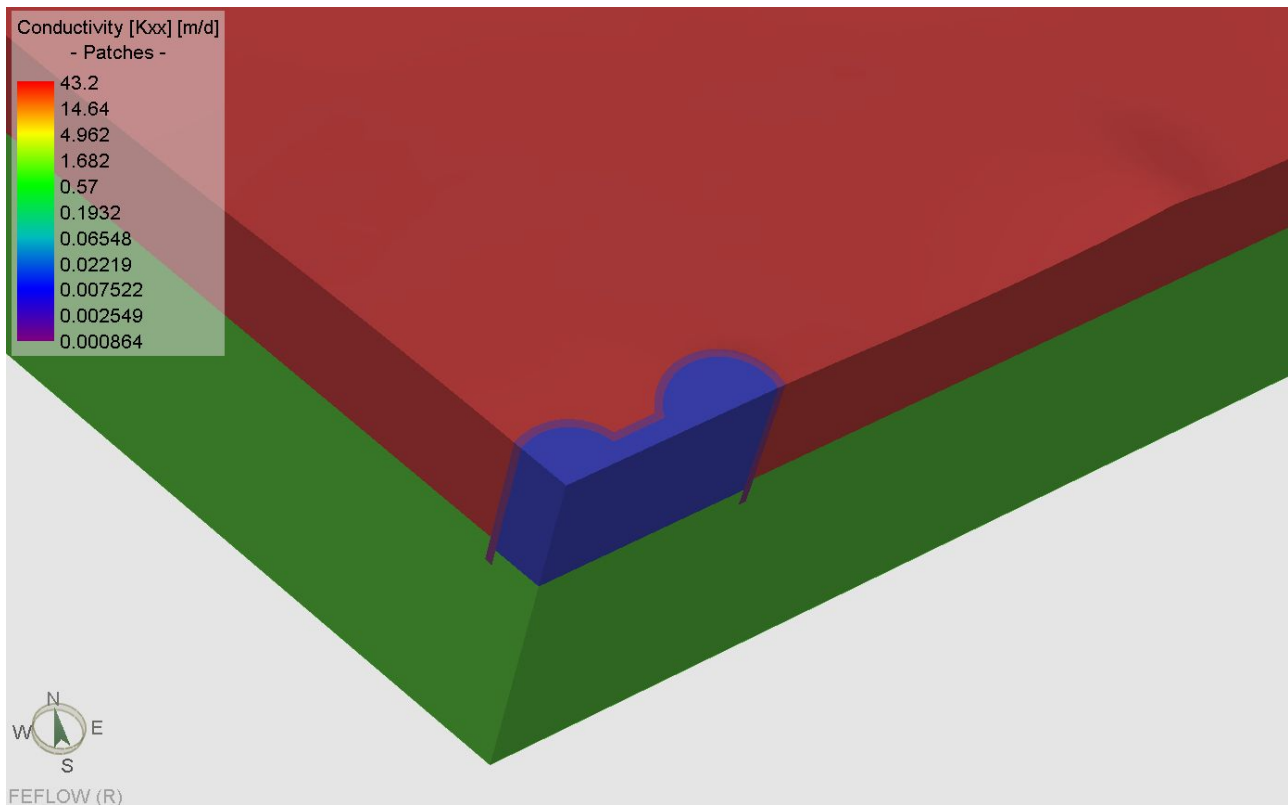
Si specifica che una conducibilità idraulica di 10^{-8} m/s attribuita alle paratie può sembrare sopravvalutata rispetto alla reale conducibilità del materiale cementizio utilizzato per la realizzazione dei diaframmi. Tuttavia, tale valore tiene cautelativamente in conto della presenza di una non perfetta impermeabilizzazione lungo i giunti dei diaframmi con possibilità di limitate infiltrazioni e quindi tale assunzione va nel senso di un'analisi di tipo cautelativo. Allo stesso modo, i valori di conducibilità idraulica considerati come riferimento per il jet-grouting non costituiscono di per sé un riferimento alla conducibilità del materiale impermeabilizzante, ma considerano che

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

l'impermeabilizzazione del terreno non sia totalmente pervasiva e pertanto permettono anche in questo caso di effettuare una valutazione di tipo cautelativo delle infiltrazioni provenienti dalle fondazioni delle torri. Valori che si attestano tra 10^{-7} m/s - 10^{-8} m/s sono da considerarsi come un riferimento realistico per la situazione definitiva, mentre valori più alti (10^{-6} m/s) sono da valutarsi per comprendere il grado di influenza che eventuali imperfezioni nella realizzazione del tappo di fondo potrebbero determinare.



		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011



FEFLOW (R)
Figura 21. Parametri sulla zona delle torri nel dominio ristretto: in rosso scuro i depositi alluvionali, in verde le sabbie e ghiaie di Messina, in verde acqua queste ultime trattate con jet grouting ed in viola le paratie.

4.4.2.4 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno sono state estratte dal dominio ampio. Al limite nord-ovest è stato assegnato, per ogni nodo su tutte le *slices*, un flusso in entrata al dominio pari a 0.00142 m/giorno. Questo valore di flusso in entrata è stato stabilito a partire dalla simulazione preliminare sul dominio ampio che, si ricorda, partiva da assunzioni ampiamente cautelative.

Sui lati est ed ovest del dominio la mancata assegnazione di condizioni al contorno significa assenza di flusso attraverso i confini, ovvero linee di flusso orientate parallelamente ad essi. Questa assunzione deriva dalla morfologia della piezometria di riferimento che mostra isopieze allineate parallelamente alla linea di costa come solitamente avviene negli acquiferi costieri in condizioni naturali. Questi limiti a flusso nullo sono comunque sufficientemente distanti dalla zona di studio su cui vengono osservati gli output, in modo da evitare il pre-condizionamento della soluzione.

Sulle zone di confine con i Pantani è stata applicata una condizione del 3° tipo per simulare lo

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

scambio con le acque superficiali dei Pantani stessi.

Al primo *layer* è stata applicata una ricarica zenitale per infiltrazione efficace uguale a quella assegnata al dominio ampio; nella simulazione dell'emungimento non è stata assegnata la ricarica alla zona delle torri, assumendo che le acque verranno allontanate dalle zone di scavo.

L'emungimento delle acque sotterranee nella zona delle torri è stato simulato analogamente a quanto fatto nel dominio ampio.

4.5 Simulazioni previsionali

4.5.1 Massima estensione del cono di emungimento nel dominio ampio

Come già anticipato nel capitolo precedente, nel dominio ampio è stata realizzata una prima simulazione previsionale finalizzata a determinare in maniera conservativa la massima estensione del cono di abbassamento piezometrico indotto dall'abbattimento della piezometrica fino alla quota massima di -15 m s.l.m. all'interno delle fondazioni durante il loro scavo e in assenza dei diaframmi di impermeabilizzazione (ossia i diaframmi di fondazione non sono stati inseriti nel modello in questa prima simulazione, benché nella realtà essi ovviamente esisteranno).

La simulazione è stata realizzata imponendo a tutti i nodi (dalla *slice* 1 alla *slice* 3) ricadenti all'interno del diametro di scavo (Figura 22) un carico piezometrico di -15 m s.l.m. e lasciando la possibilità al codice di calcolare la portata di emungimento necessaria (condizione del 1° tipo con *constraint* di flusso solo uscente).

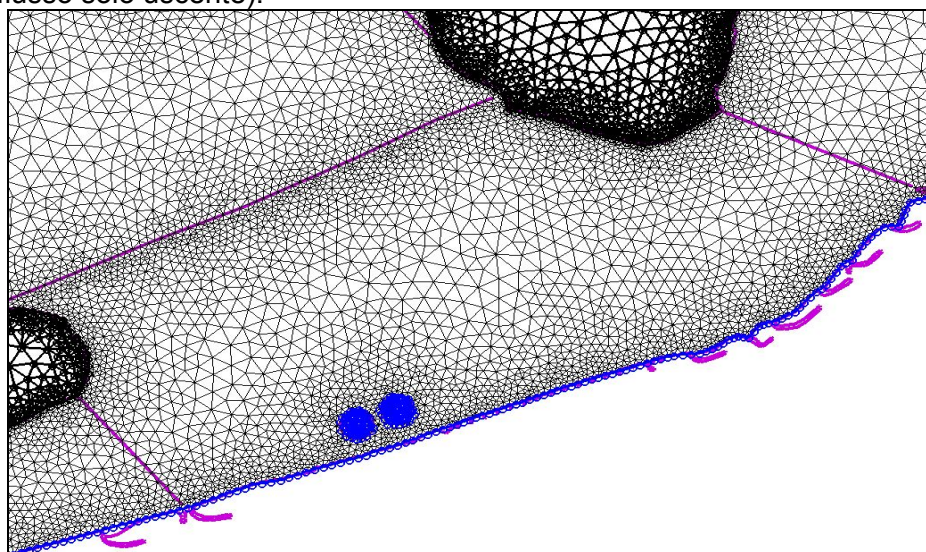


Figura 22. Condizione del 1° tipo con *constraint* di flusso solo uscente applicata a tutti i nodi ricadenti all'interno del diametro di scavo; vista della *slice* 1.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

In Figura 23 è mostrata una vista tridimensionale della distribuzione dei carichi (intesi come carichi equivalenti d'acqua dolce) dove si può osservare il cono di depressurizzazione indotto dall'emungimento delle acque sotterranee per il mantenimento dei carichi a quota -15 m s.l.m. nella zona delle torri (cfr anche Figura 18).

Va sottolineato ancora una volta che questa simulazione sovrastima significativamente sia la portata di emungimento e, di conseguenza, gli effetti sulla piezometrica, ossia le dimensioni del cono di depressurizzazione. Questo perché non è possibile rappresentare a questa scala l'esatta geometria delle opere di impedimento al flusso, ed in particolare non è possibile rappresentare le paratie verticali infisse fino alla quota di -38.5 m s.l.m. Lo scopo di questa simulazione era infatti esclusivamente quello di determinare in modo conservativo l'ampiezza della zona perturbata dall'emungimento, al fine di dimensionare il dominio ristretto, su cui è possibile riprodurre con maggior dettaglio la geometria delle opere e soprattutto la presenza delle paratie verticali.

4.5.2 Corso d'opera: fase di massimo abbattimento piezometrico

4.5.2.1 Calcolo delle portate di emungimento

La valutazione delle massime portate di emungimento in corso d'opera è stata fatta sul dominio ristretto, in cui la *mesh* a maggior discretizzazione e la distribuzione dei parametri hanno permesso di riprodurre con buon dettaglio le geometrie delle fondazioni (Figura 21) durante la fase di massimo abbattimento piezometrico.

L'imposizione del carico piezometrico a -15 m s.l.m. dentro l'area di scavo ha fatto calcolare al codice le portate di emungimento corrispondenti a diversi valori di conducibilità idraulica per il "tappo di fondo" dello scavo, ossia la porzione di terreno pre-trattato con jet-grouting.

In Tabella 8 sono presentati i valori di conducibilità idraulica utilizzati per simulare il tappo di fondo e le portate a regime, differenziate per torre ovest ed est.

Le simulazioni hanno una durata di 365 giorni e le portate in uscita dalle torri subiscono un lieve aumento in funzione del tempo; per questo motivo vengono restituite quelle finali, considerate ampiamente conservative e rappresentative del raggiungimento dello stato stazionario.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011



a) FEFLOW (R)



b) FEFLOW (R)

Figura 23. Vista tridimensionale della distribuzione dei carichi idraulici calcolata nel dominio di flusso ampio nella simulazione conservativa di massima estensione (esagerazione verticale 5:1).

Nella simulazione che considera una conducibilità idrauliche del tappo di fondo dell'ordine di quelle a cui si tenderà, secondo gli input progettuali, ovverosia di 10^{-7} m/s (d'ora in avanti **B**) è risultata una **portata totale di emungimento a regime pari a 4.2 l/s (363 m³/giorno)**, mentre nella

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

simulazione più pessimistica con impermeabilizzazione meno efficace del tappo di fondo e con conducibilità idrauliche di 10^{-6} m/s (d'ora in avanti **A**) il modello calcola 12.1 l/s (1043 m³/giorno). E' stata valutata infine l'ipotesi progettualmente di tenuta quasi perfetta del tappo di fondo, simulato con conducibilità idrauliche di 10^{-8} m/s (**C**), che genera portate di emungimento pari a circa 1.4 l/s (117 m³/giorno).

ID simulazione	K (m/s) tappo di fondo	Portata a regime		Portata a regime		
		m3/d	l/s	Torre	m3/d	l/s
A	1E-06	-1043	-12.1	W	-534	-6.2
				E	-509	-5.9
B	1E-07	-363	-4.2	W	-216	-2.5
				E	-146	-1.7
C	1E-08	-117	-1.4	W	-59	-0.7
				E	-58	-0.7

Tabella 8. Portate di emungimento calcolate nel dominio ristretto alle diverse ipotesi di conducibilità idraulica (K) del tappo di fondo. Le portate hanno segno negativo perché costituiscono delle uscite dalla falda.

La simulazione **A** deve dunque essere considerata come un'analisi di rischio, essendo la simulazione **B** quella progettualmente più realistica. La simulazione **C** è invece una condizione ottimale difficilmente raggiungibile.

In Tabella 9 è presentato il bilancio di massa sul dominio ristretto (espresso sia in m³/giorno che in l/s) relativo alle condizioni naturali, confrontato a quelli relativi alla fase di massimo abbattimento piezometrico nelle due configurazioni di conducibilità idraulica del tappo di fondo A e B (l'opzione C non è riportata per brevità). Al richiamo di acqua indotto dall'emungimento corrisponde un aumento del flusso netto entrante al dominio dal mare.

Condizione al contorno	Ante-Operam		Corso opera A (K 10^{-6} m/s)		Corso opera B (K 10^{-7} m/s)	
	m3/g	l/s	m3/g	l/s	m3/g	l/s
Condizione 1° tipo	38.0	0.44	115.8	1.34	-71.7	-0.83
- limite mare	38.0	0.44	1159.5	13.42	290.3	3.36
- emungimento pile	0.0	0	-1042.8	-12.07	-362.9	-4.2
Condizione 2° tipo - ricarica da NO	162.4	1.88	162.4	1.88	162.4	1.88
Ricarica zenitale	242.8	2.81	242.8	2.81	242.8	2.81

Tabella 9. Quantità di flusso per i vari elementi del dominio ristretto nelle condizioni naturali e nella fase di massimo abbattimento piezometrico nelle due simulazioni A e B; i numeri positivi indicano flusso in ingresso nella falda, i negativi flusso in uscita dalla falda.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

In Figura 24 sono presentati graficamente gli output relativi alla simulazione A, più conservativa. In generale la deformazione sulla superficie piezometrica è minima (immagine a), a tal punto da non essere apprezzabile nella visualizzazione in pianta con isopieze ogni m. Solamente nelle sezioni che tagliano il dominio nella zona delle torri si possono apprezzare dei flussi in ingresso dal tappo di fondo (immagine b).

In Figura 25 si osservano gli stessi output relativamente alla simulazione B, rappresentativa delle condizioni attese da progetto, con conducibilità idraulica del tappo di fondo pari a 10^{-7} m/s e portata di emungimento di 4.2 l/s. La deformazione dei carichi in sezione è ancora minore che nel caso precedente e il gradiente verticale innescato dal moto di filtrazione è veramente ridotto.

4.5.2.2 Effetti sul bilancio idrico dei Pantani

Al fine di valutare a livello globale dell'area dei Pantani l'effetto degli emungimenti reali dalle fondazioni calcolati con il modello ristretto, le portate di emungimento da esso ricavate sono state utilizzate per eseguire una nuova simulazione nel dominio ampio. In questa nuova simulazione, nella posizione da cui emungeranno le fondazioni delle torri (parte bassa del tappo di fondo a circa -38,5 m nelle ghiaie e sabbie di Messina), sono stati inseriti dei nodi a cui è stata imposta l'estrazione dal modello di una portata equivalente a quella calcolata con il dominio ristretto, utilizzando la condizione al contorno del 4° tipo ("well") che genera un flusso radiale verso uno o più nodi della *mesh*.

Questo ha permesso di verificare i reali effetti indotti dall'emungimento sul dominio a grande scala, in cui non sono rappresentate con dettaglio le opere di fondazione, ma da cui si possono estrarre dati di bilancio indicativi del reale impatto sugli scambi falda-Pantani, ovverosia una delle risposte principali tra quelle che la modellizzazione doveva fornire.

In queste simulazioni sono state considerate contestualmente le fondazioni del viadotto Pantano, che provocano una riduzione localizzata della permeabilità dell'acquifero. Esse sono state simulate applicando agli elementi che le rappresentano una conducibilità idraulica di 10^{-7} m/s ed una porosità del 5%. In Figura 26 una visualizzazione in pianta mostra la distribuzione delle conducibilità idrauliche utilizzata: i) il tappo di fondo delle fondazioni delle torri è stato simulato fino alla quota di -38.5 m s.l.m. (slice 6); ii) la zona di trattamento delle fondazioni del viadotto Pantano raggiunge la profondità di -30 m ca.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

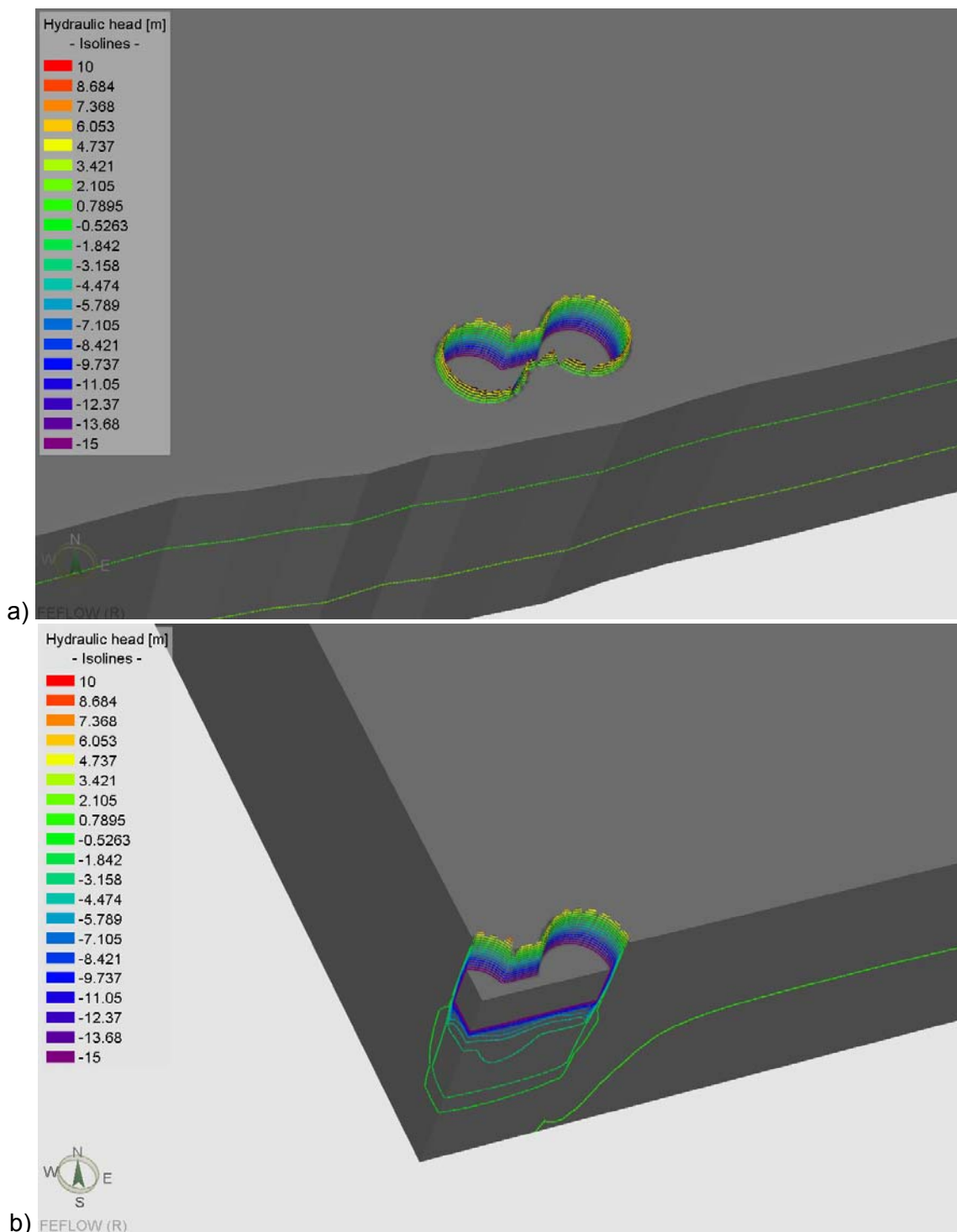


Figura 24. Distribuzione dei carichi calcolata nel dominio di flusso nella fase di massimo abbattimento della simulazione A: a) vista tridimensionale; b) dominio sezionato sulla zona delle torri (esagerazione verticale 2:1). Si noti che il grigio rappresenta il solido di dominio saturo, quindi il tetto è la superficie della tavola d'acqua; con equidistanza 1 m delle isolinee nella figura "a" in superficie vicino alle torri non si percepisce l'abbassamento della piezometrica.

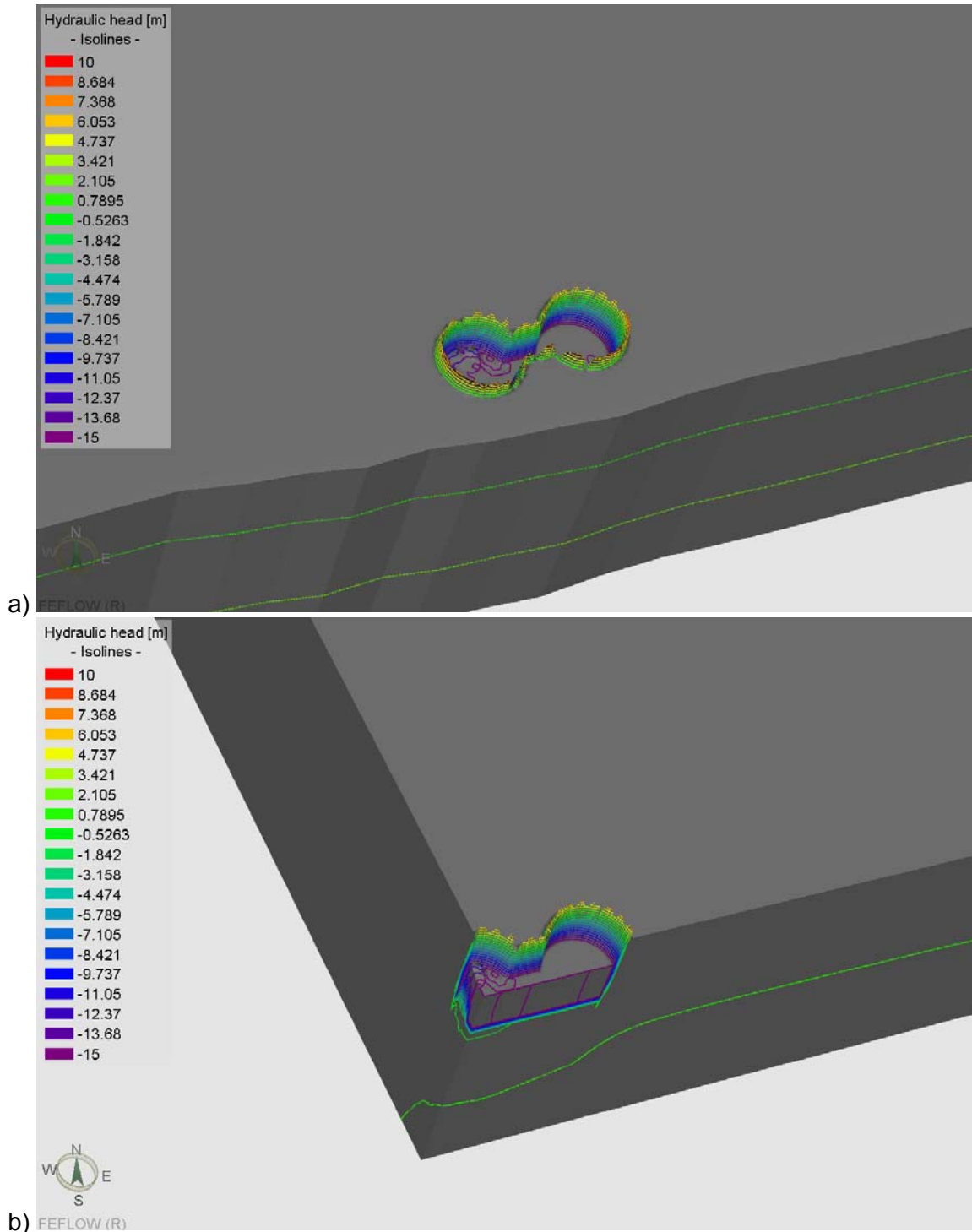


Figura 25. Distribuzione dei carichi calcolata nel dominio di flusso nella fase di massimo abbattimento della simulazione B: a) vista tridimensionale; b) dominio sezionato sulla zona delle torri (esagerazione verticale 2:1). Si noti che il grigio rappresenta il solido di dominio saturo, quindi il tetto è la superficie della tavola d'acqua; con equidistanza 1 m delle isolinee nella figura "a" in superficie vicino alle torri non si percepisce l'abbassamento della piezometrica.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

Va specificato che per il viadotto Pantano in fase di modellizzazione è stato verificato solo l'effetto di barriera, non sono stati verificati gli effetti determinati dall'emungimento temporaneo dagli scavi delle fondazioni. Questa scelta è stata fatta per i seguenti motivi: i) le fondazioni del viadotto sono di modesta profondità; ii) la loro estensione è relativamente ridotta e non verranno realizzate simultaneamente, quindi gli effetti del drenaggio saranno localizzati e di breve durata; iii) alla luce delle simulazioni preliminari eseguite sui pozzi di fondazione delle torri, che hanno estensione e profondità ben più rilevanti, si è notato, come si dirà in seguito che gli impatti sulla falda sono minimi e pertanto gli impatti transitori del viadotto sono stati ritenuti, ragionevolmente, trascurabili.

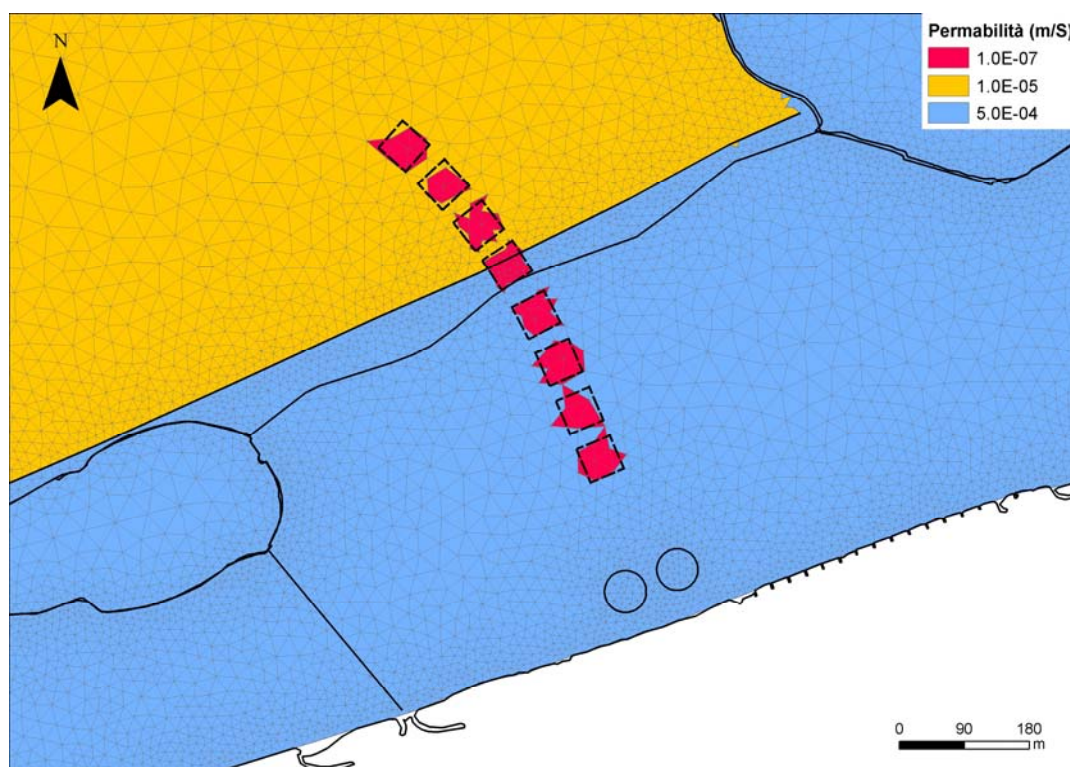


Figura 26. Distribuzione delle conducibilità idrauliche utilizzata nelle modellizzazioni di cui al presente paragrafo per simulare la presenza delle fondazioni del viadotto Pantano; in figura i quadratini con riempimento rosso indicano schematicamente la zona in cui le fondazioni del viadotto determineranno una riduzione della conducibilità idraulica nell'acquifero.

La valutazione è stata effettuata utilizzando le due portate di emungimento presso le torri (12,1 l/s e 4.2 l/s) corrispondenti alle due simulazioni A e B del dominio ristretto, con conducibilità del tappo di fondo a 10^{-6} e 10^{-7} m/s rispettivamente. Non è stata eseguita una simulazione con conducibilità del tappo di fondo di 10^{-8} m/s poiché, come si vedrà già gli effetti dell'emungimento con permeabilità del tappo di fondo più elevate determinano scarsi effetti sul bilancio dei Pantani.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

In Figura 27 sono illustrate due viste tridimensionali della distribuzione dei carichi piezometrici sul dominio ampio nella simulazione A, che deve essere intesa comunque come la più conservativa, dove si può osservare che l'effetto dell'emungimento di 12,1 l/s presso le torri sulla tavola d'acqua è minimo: essa infatti subisce abbassamenti di 0.5-1 m su una porzione molto ridotta di territorio. Nella vista in sezione di Figura 28 si può invece osservare l'effetto di depressurizzazione generato a quota -38.5 m s.l.m., che è molto circoscritto alla zona di infiltrazione attraverso le opere di sbarramento al flusso e di abbattimento del gradiente verticale (paratie e jet grouting).

In Figura 29 e Figura 30 le stesse viste tridimensionali mostrano i risultati della simulazione B (rappresentativa delle condizioni attese da progetto), dove il cono di depressurizzazione indotto è estremamente blando e può essere apprezzato solo con spaziatura delle isopieze ogni 20 cm.

Oltre ad una rappresentazione visiva degli effetti dell'emungimento è stato possibile entrare maggiormente nei dettagli quantitativi delle variazioni indotte dall'emungimento interrogando il modello circa i bilanci di flusso in entrata ed uscita dalla falda verso i vari limiti (mare, fondazioni, Pantani).

A premessa dell'analisi quantitativa dell'impatto va ricordato che si tratta di un impatto transitorio, che avverrà solamente nella fase del corso d'opera e che, inoltre, nella presente analisi esso viene conservativamente sovrastimato, assumendo che l'abbattimento piezometrico a -15 m s.l.m. sia istantaneo e copra tutta la durata dello scavo, mentre nella realtà varierà progressivamente da 0.5 a -15 m s.l.m. man mano che lo scavo viene approfondito.

Sono stati analizzati i bilanci di massa ottenuti dalle simulazioni A e B sul dominio ampio (confrontati con i valori dell'ante-operam di Tabella 3) ed in Tabella 10 vengono sintetizzati i risultati significativi, ossia quelli relativi alle variazioni dei flussi di scambio falda-Pantani generati dagli emungimenti. I bilanci di massa vengono presentati anche in valore percentuale rispetto alle voci di bilancio del modello nelle condizioni naturali. In Figura 31 gli stessi dati sono resi graficamente come istogramma.

E' utile qui ricordare che i Pantani in condizioni originali presentano un bilancio positivo rispetto alla falda, ossia ricevono attraverso il fondo più acqua dalla falda rispetto a quella che rilasciano, per un ammontare pari a circa 17,6 l/s (cfr. Tabella 3 e 4.4.1.7). E' bene altresì chiarire sin da subito che in entrambe le simulazioni di emungimento eseguite, i Pantani continuano a presentare un bilancio positivo, ossia continuano a ricevere acqua dalla falda attraverso il fondo e gli arrivi continuano ad essere in eccesso rispetto alle perdite.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> <i>Data</i> F0 20/06/2011

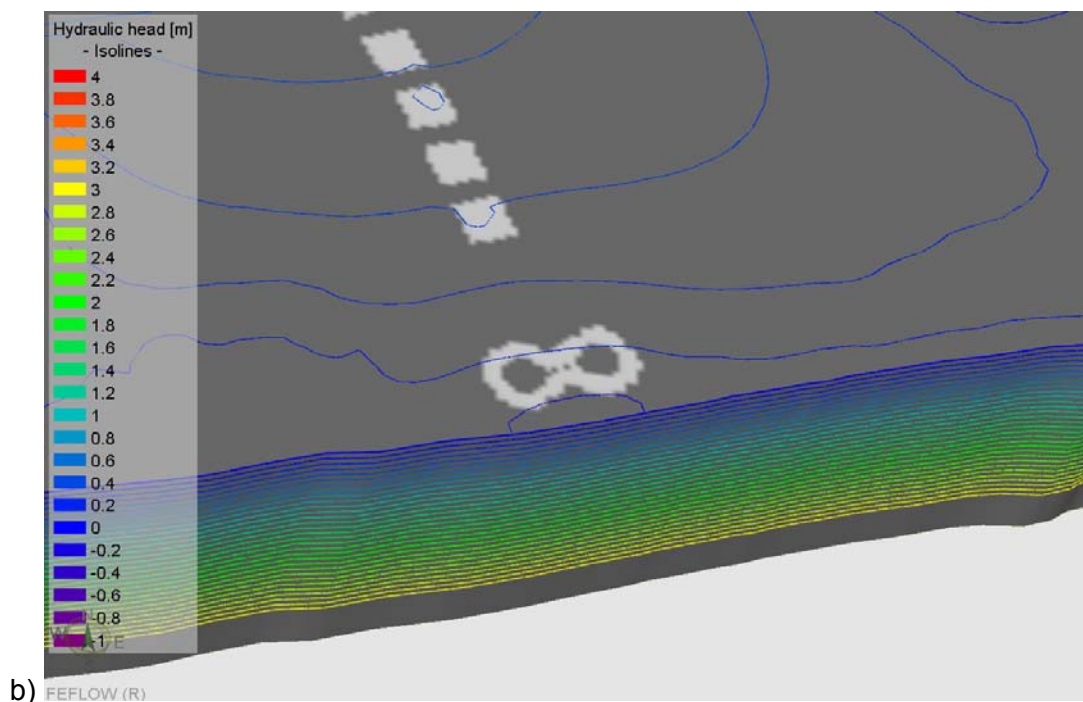
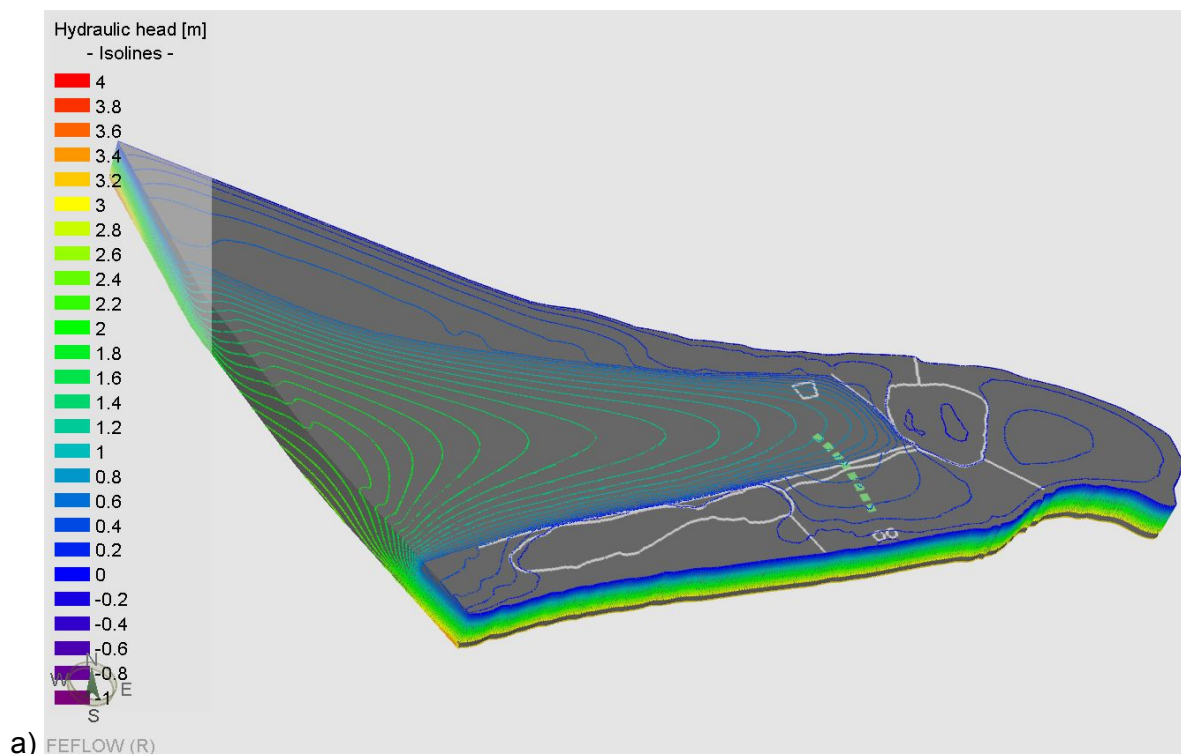


Figura 27. Vista tridimensionale dei carichi idraulici calcolati nel dominio di flusso ampio nella fase di massimo emungimento in corso d'opera nella simulazione A: a) vista 3D completa, b) zoom sulla zona delle torri (esagerazione verticale 2:1; equidistanza isopieze 0,25m); i quadrati bianchi indicano schematicamente la posizione delle fondazioni del viadotto Pantano, i cerchi la posizione delle fondazioni delle torri.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

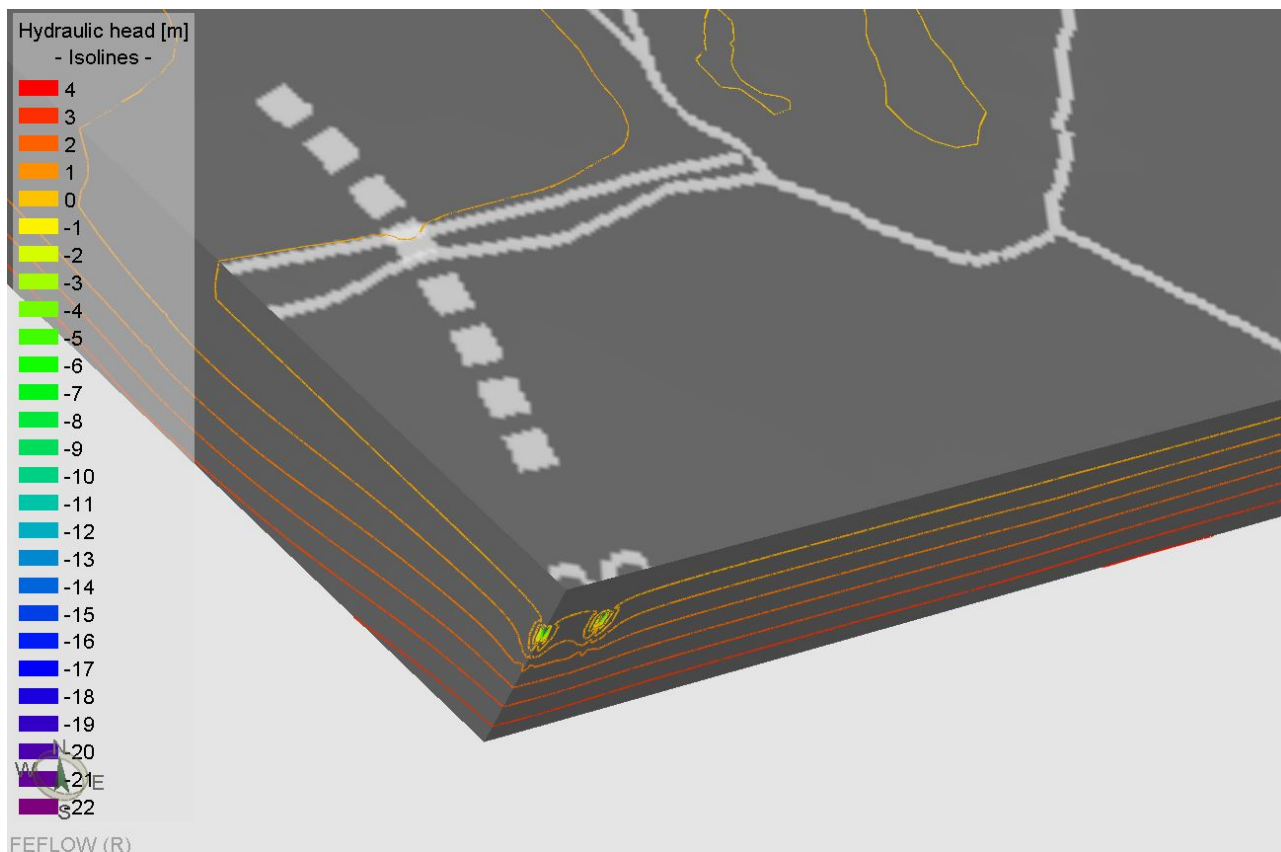


Figura 28. Vista tridimensionale della distribuzione dei carichi idraulici calcolati nel dominio di flusso ampio nella fase di massimo emungimento in corso d'opera nella simulazione A: sezioni presso la zona delle torri (esagerazione verticale 2:1; equidistanza isopieze 1 m); i quadrati bianchi indicano schematicamente la posizione delle fondazioni del viadotto Pantano, i cerchi la posizione delle fondazioni delle torri.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

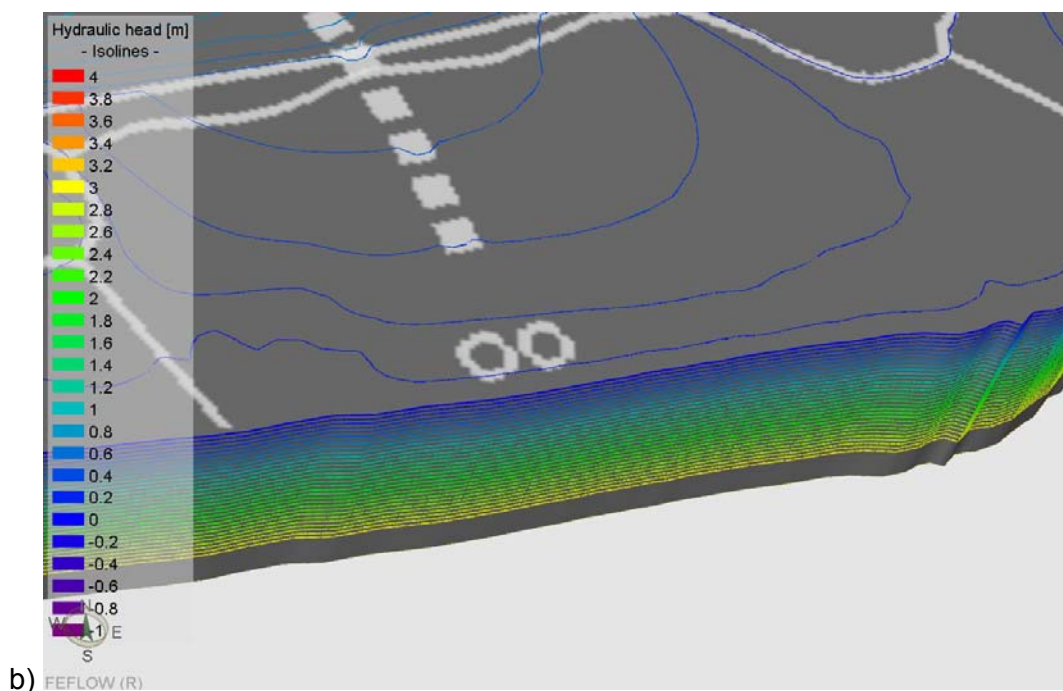
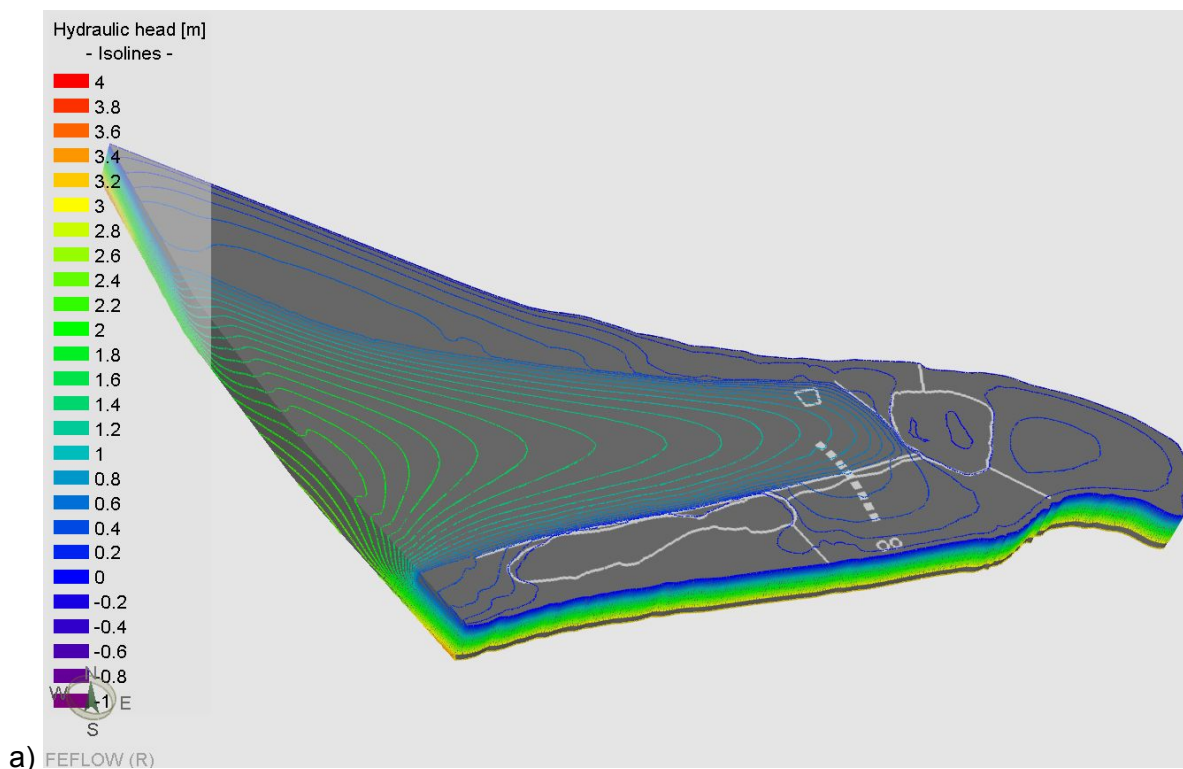


Figura 29. Vista tridimensionale della distribuzione dei carichi idraulici calcolata nel dominio di flusso nella fase di massimo emungimento in corso d'opera nella simulazione B: a) vista 3D completa, b) zoom sulla zona delle torri (esagerazione verticale 2:1; equidistanza isopieze 0,2m); i quadrati bianchi indicano schematicamente la posizione delle fondazioni del viadotto Pantano, i cerchi la posizione delle fondazioni delle torri.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

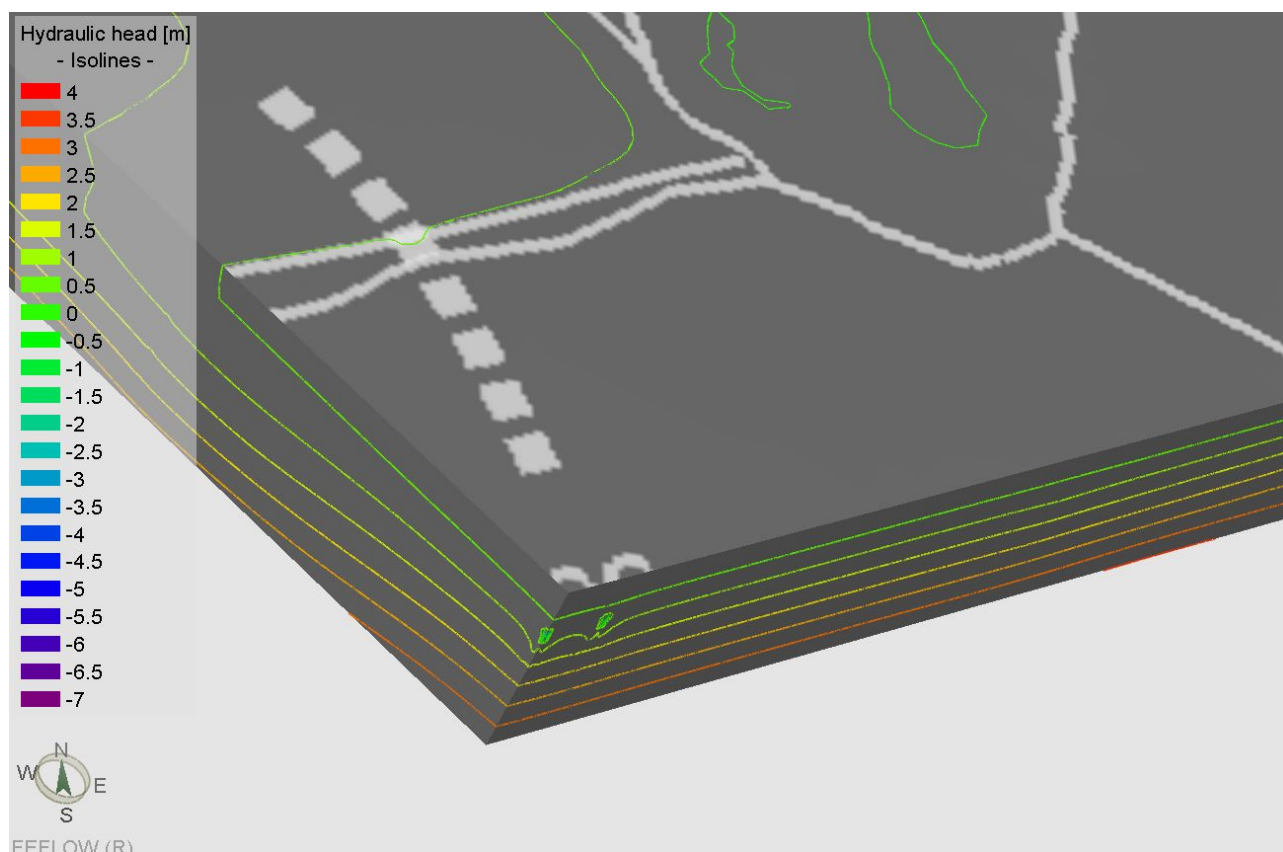


Figura 30. Vista tridimensionale della distribuzione dei carichi idraulici calcolata nel dominio di flusso nella fase di massimo emungimento in corso d'opera nella simulazione B: sezioni presso la zona delle torri (esagerazione verticale 2:1; equidistanza isopieze 0,2m); i quadrati bianchi indicano schematicamente la posizione delle fondazioni del viadotto Pantano, i cerchi la posizione delle fondazioni delle torri.

Nella simulazione B (con tappo di fondo a permeabilità 1×10^{-7} m/s) le variazioni di afflussi ai laghi sono trascurabili e si attestano sugli 0,8 l/s globali (Tabella 10 e Figura 31). Anche nella simulazione A (con tappo di fondo a permeabilità 1×10^{-6} m/s) le variazioni di afflussi ai laghi sono minime e si attestano su 1 l/s (Tabella 10 e Figura 31).

In entrambe le configurazioni di emungimento la portata estratta dalla falda in corrispondenza delle fondazioni è prevalentemente fornita da un richiamo di acqua salata dal mare e per la restante parte da acqua sotterranea che proviene da monte.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

	Corso opera – A ($K 10^{-6}$ m/s)			Corso opera – B ($K 10^{-7}$ m/s)		
	m ³ /g	l/s	% variazione rispetto ante-operam	m ³ /g	l/s	% variazione rispetto ante-operam
Pantani cumulativo	-1401	-16.2	-8%	-1509	-16.4	-7%
Pantano Grande	-981	-11.4	-6%	-1031	-11.3	-6%
Pantano Piccolo	-420	-4.9	-13%	-477	-5.1	-9%

Tabella 10. Variazioni di flussi di scambio falda -Pantani nelle due configurazioni di tappo di fondo rispetto alle condizioni naturali ante-operam; è restituito anche il valore percentuale rispetto all'ante-operam. Il segno meno nelle colonne che indicano i valori di portata (m³/g e l/s) indica afflussi dalla falda verso i Pantani. Il segno meno nella colonna delle percentuali indica la decrescita di flusso dalla falda verso i Pantani tra la situazione ante-operam e la situazione in corso d'opera con estrazione di acqua dai pozzi di fondazione.

Alla luce di questi dati emerge con chiarezza che, in condizioni standard di realizzazione del tappo di fondo delle fondazioni, le influenze sul regime idrogeologico dei Pantani sono irrilevanti. Variazioni di deflusso dell'ordine di quelle calcolate per questo tipo di situazione rientrano ampiamente in quelle che verosimilmente sono le normali oscillazioni stagionali del regime di deflusso in falda. In ogni caso, anche assumendo un'ipotesi più pessimistica di tappo di fondo con tenuta meno pervasiva ($k=1 \times 10^{-6}$ m/s), le variazioni indotte sui Pantani sono basse, soprattutto quando si consideri che i laghi sono sempre e comunque collegati al mare e che: i) le variazioni di deflusso in falda possono essere compensate da minimi incrementi di scambi di acque con il mare medesimo senza grossi sconvolgimenti del regime idrologico degli specchi d'acqua poiché scambi con il mare avvengono già allo stato attuale; ii) gli impatti legati agli emungimenti in falda (cfr. § 3.5.1) sono già attualmente di ordine assai maggiore di quanto non sarà comunque l'effetto di emungimento dalle fondazioni (peraltro solo temporaneo); iii) in caso di tenuta non perfetta del tappo di fondo si potrà comunque procedere in corso d'opera a integrazioni del trattamento jet grouting con incremento della tenuta medesima.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

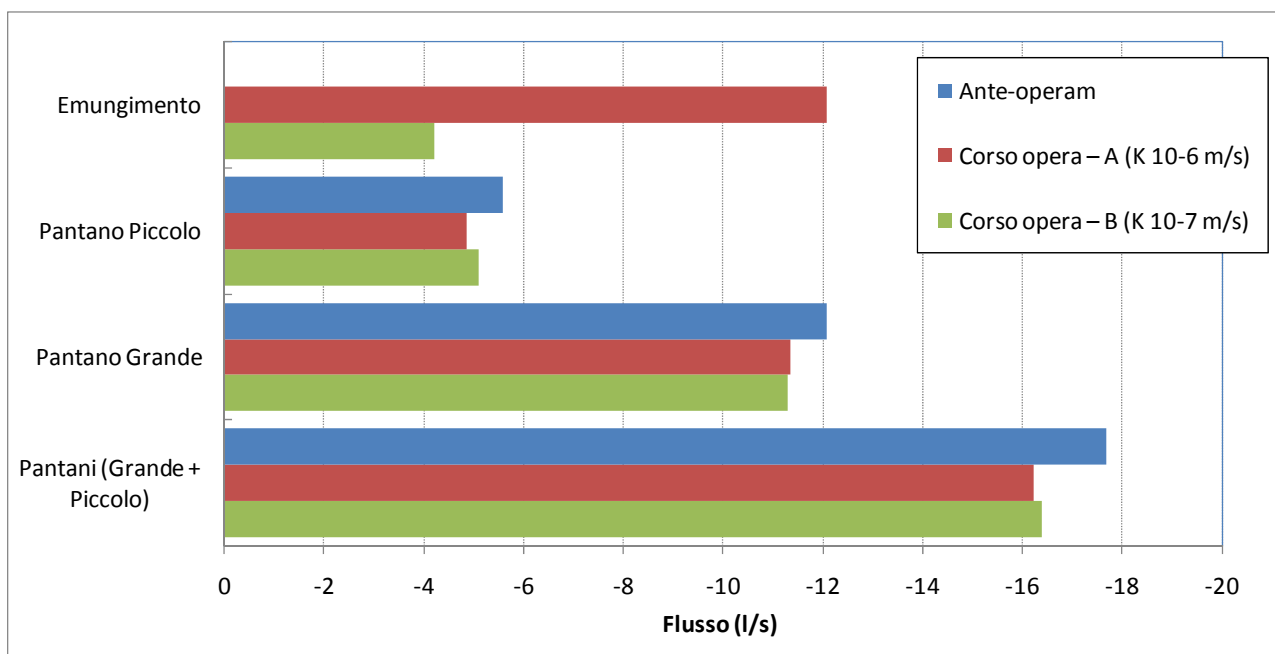


Figura 31. Istogramma degli afflussi falda dalla falda verso i Pantani nel dominio ampio; i valori sono negativi perché pozzi rappresentano uscite dalla falda verso i Pantani.

Da ultimo è possibile fare alcune considerazioni sull'effetto indotto dalla presenza delle fondazioni del viadotto Pantano. Di fatto, nella fase di estrazione di acqua dai pozzi di fondazione delle torri la presenza di questa struttura non ha un'influenza consistente sul deflusso in falda, anche perché i due pozzi di fondazione sono disposti in maniera praticamente simmetrica rispetto al suo asse. Sia nello scenario A sia nello scenario B non si notano alterazioni apprezzabili del deflusso in falda. Questo aspetto è meglio enfatizzato dalle immagini di Figura 27b e Figura 29b ove si osservano esclusivamente delle modestissime alterazioni delle linee equipotenziali nell'immediato intorno delle zone di fondazione.

4.5.3 Post-operam: fondazioni terminate

Al fine di valutare l'eventuale effetto barriera delle fondazioni sul flusso di falda nella fase post-operam, è stata implementata un'apposita simulazione nel dominio ristretto, in cui l'emungimento delle acque sotterranee è stato ovviamente disattivato, sono state mantenute le paratie con conducibilità idraulica di 10^{-8} m/s e nella zona delle torri è stata assegnata una conducibilità di 10^{-8} m/s a simulare l'opera.

Contestualmente sono state considerate le fondazioni del viadotto Pantano, con una conducibilità idraulica di 10^{-7} m/s. Per le fondazioni di quest'opera è stata adottata una permeabilità maggiore

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

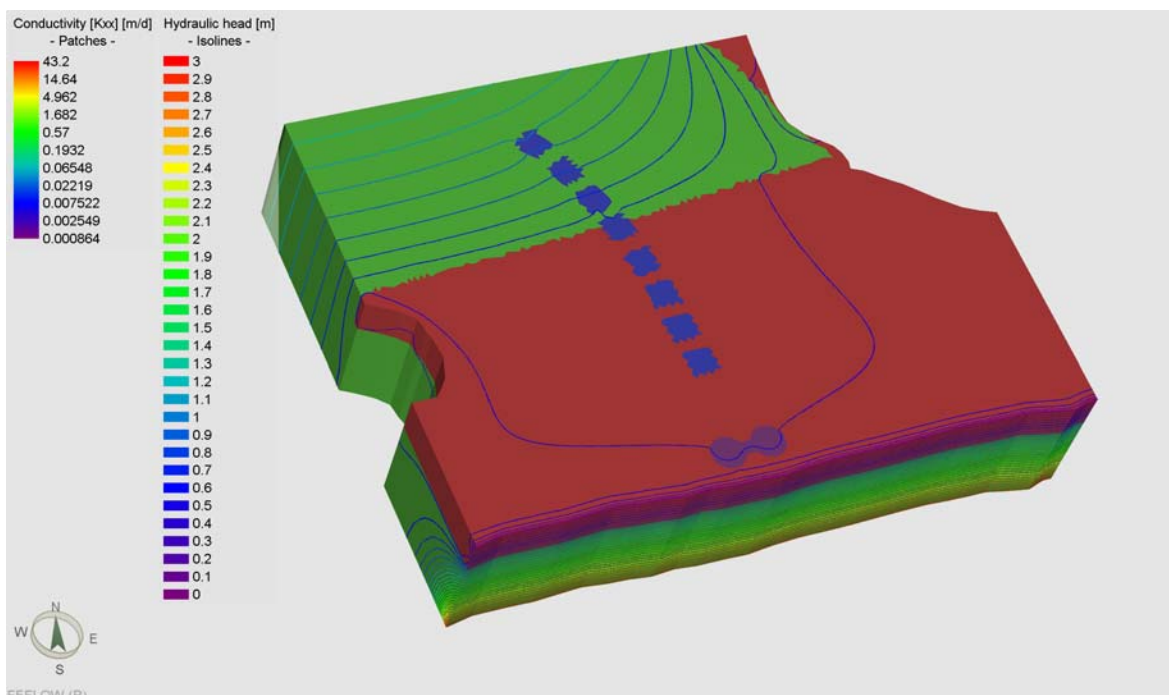
rispetto a quella delle fondazioni delle torri, poiché la gran parte dell'effetto ostacolo sarà determinata dalla presenza di una voluminosa parte di terreno trattata con jet grouting che, per quanto pervasivo non arriverà in questo caso a determinare una riduzione drastica della permeabilità.

La simulazione è stata eseguita allo stato transitorio per una durata di tempo di 10 anni, per valutare gli effetti in condizioni di equilibrio, ossia nel lungo termine.

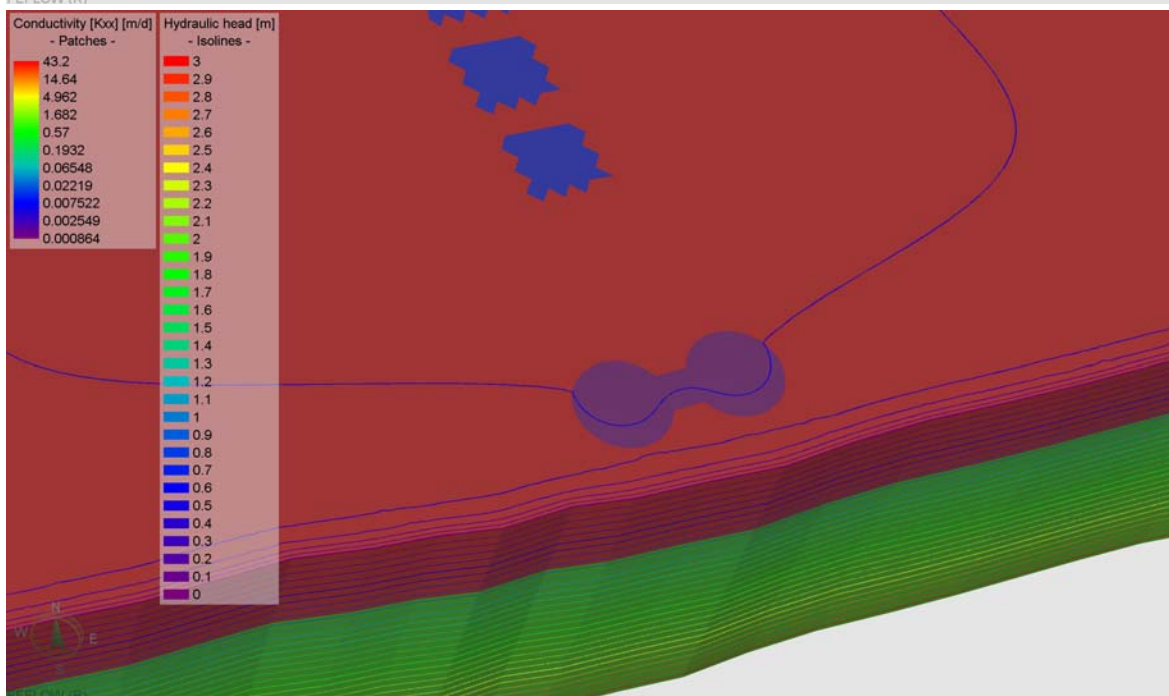
In Figura 32 è mostrata la distribuzione dei carichi piezometrici risultante, da cui si possono osservare modesti effetti di deformazione delle isopieze. Nessuna delle due strutture determina un effetto barriera significativo sul deflusso in falda. Infatti l'asse del viadotto Pantano risulta essere praticamente parallelo alle linee di flusso della falda; pertanto esse subiscono una modesta perturbazione solo nell'immediato intorno dell'opera. Nel caso delle fondazioni delle torri invece le linee di flusso aggirano l'opera in calcstruzzo lateralmente (cfr. Figura 33). Ovviamente nell'intorno delle opere si osserva una certa perturbazione del flusso fino a qualche decina di metri distanza dal loro perimetro (30-40m), ma oltre questo raggio d'influenza, anche grazie alla elevata conducibilità idraulica dei depositi alluvionali, le perturbazioni si annullano.

Il bilancio di flusso, come ovvio, non viene assolutamente alterato dalla presenza delle fondazioni.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011



a)



b)

Figura 32. Vista tridimensionale della distribuzione dei carichi piezometrici nel dominio ristretto nella fase post-operam (a), ossia a fondazioni ultimate; zoom sulla zona delle torri (b) (esagerazione verticale 2:1; equidistanza delle isopieze 0,1 m); sono visualizzate anche le K delle unità idrogeologiche e delle opere; i quadrati blu indicano schematicamente la posizione delle fondazioni del viadotto Pantano, i cerchi viola la posizione delle fondazioni delle torri.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

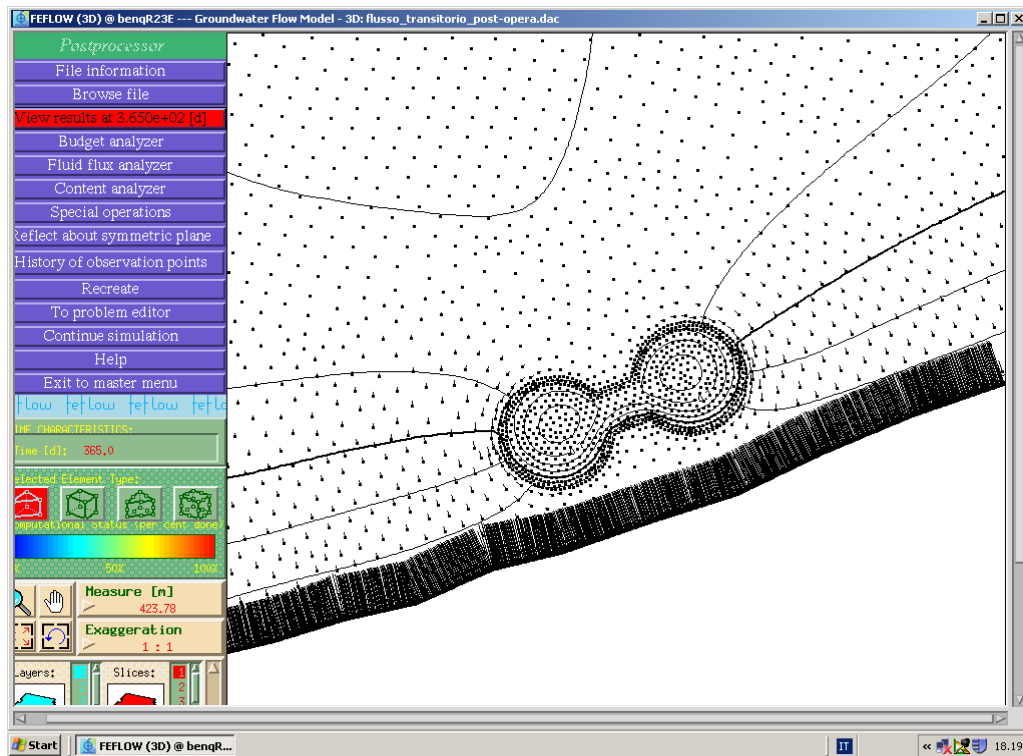


Figura 33. Vista in pianta della distribuzione dei vettori velocità sulla zona delle torri.

4.5.4 Considerazioni sull’impatto delle opere sull’intrusione salina

L’impatto delle opere sull’intrusione salina, o meglio sulla posizione e geometria della zona di transizione acqua dolce-acqua salata, è stato valutato sul dominio ampio, nelle due simulazioni A e B, corrispondenti alle portate di emungimento di 12,1 e 4.2 l/s rispettivamente. Si ricorda che nelle simulazioni in regime perturbato, ossia con estrazione di acqua dai pozzi di fondazione delle torri, è stato considerato un periodo di emungimento della durata di 1 anno.

In Figura 34 sono mostrate alcune viste tridimensionali della distribuzione delle concentrazioni relative alla fase di massimo abbattimento piezometrico nella simulazione A sul dominio ampio, dove si può osservare l’effetto dell’emungimento di 12,1 l/s sulla distribuzione della salinità. Si genera un richiamo di acqua salata dalla linea di costa fino alla zona delle torri, con effetti diversi sopra e sotto la quota di emungimento (-38.5 m s.l.m.). Sopra la quota aumenta considerevolmente il richiamo di acqua dolce e la zona di transizione risulta schiacciata e verticalizzata, con l’emungimento che impedisce all’acqua dolce di fluire a mare nello stretto intorno delle fondazioni; sotto i -38.5 m s.l.m. avviene invece un ispessimento della zona di

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

transizione con leggera risalita (Figura 35).

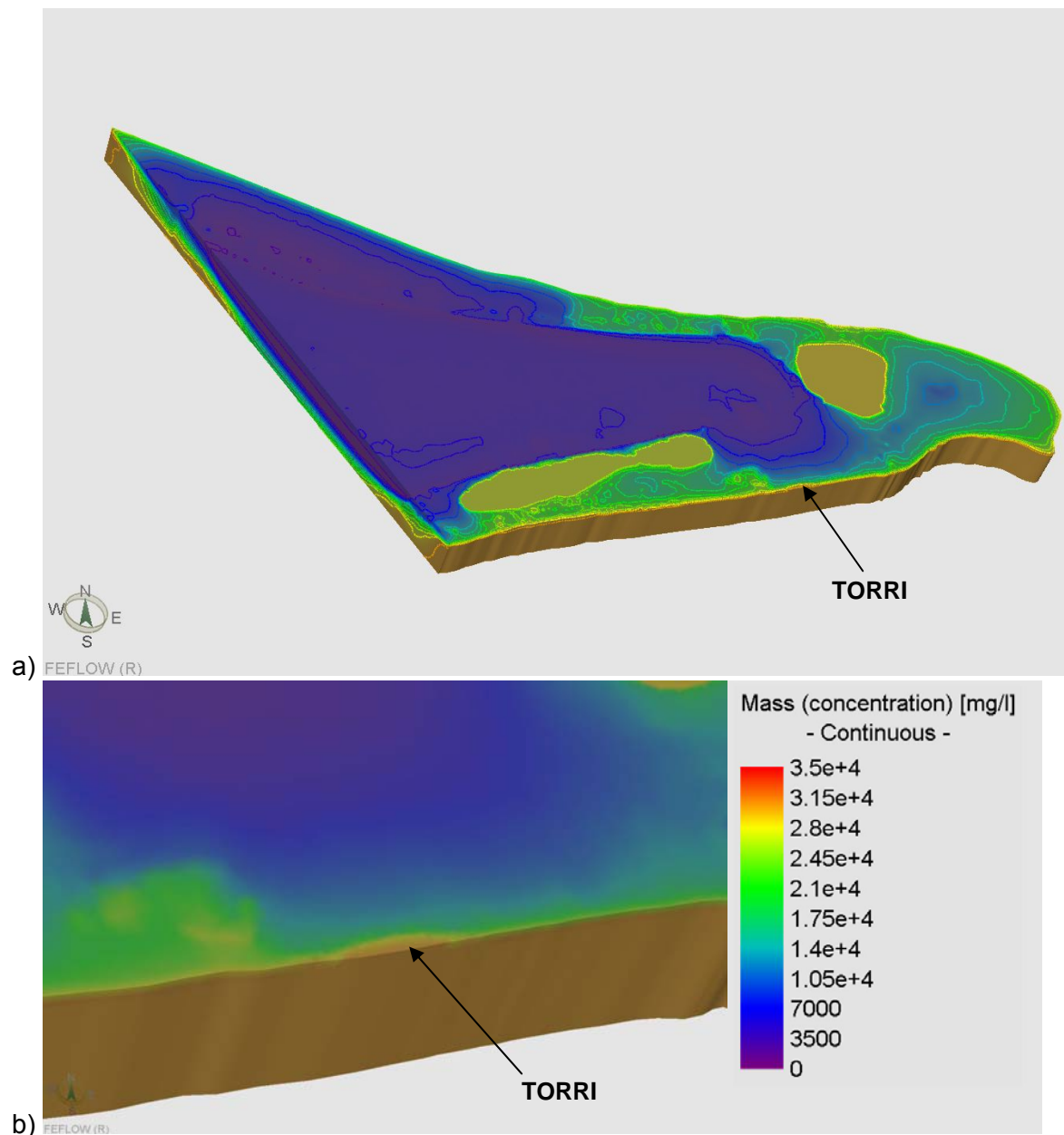


Figura 34. Vista tridimensionale della distribuzione delle concentrazioni calcolata nel dominio di flusso ampio nella fase di massimo emungimento - simulazione A (a); zoom sulla zona delle torri (b) (esagerazione verticale 2:1).

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

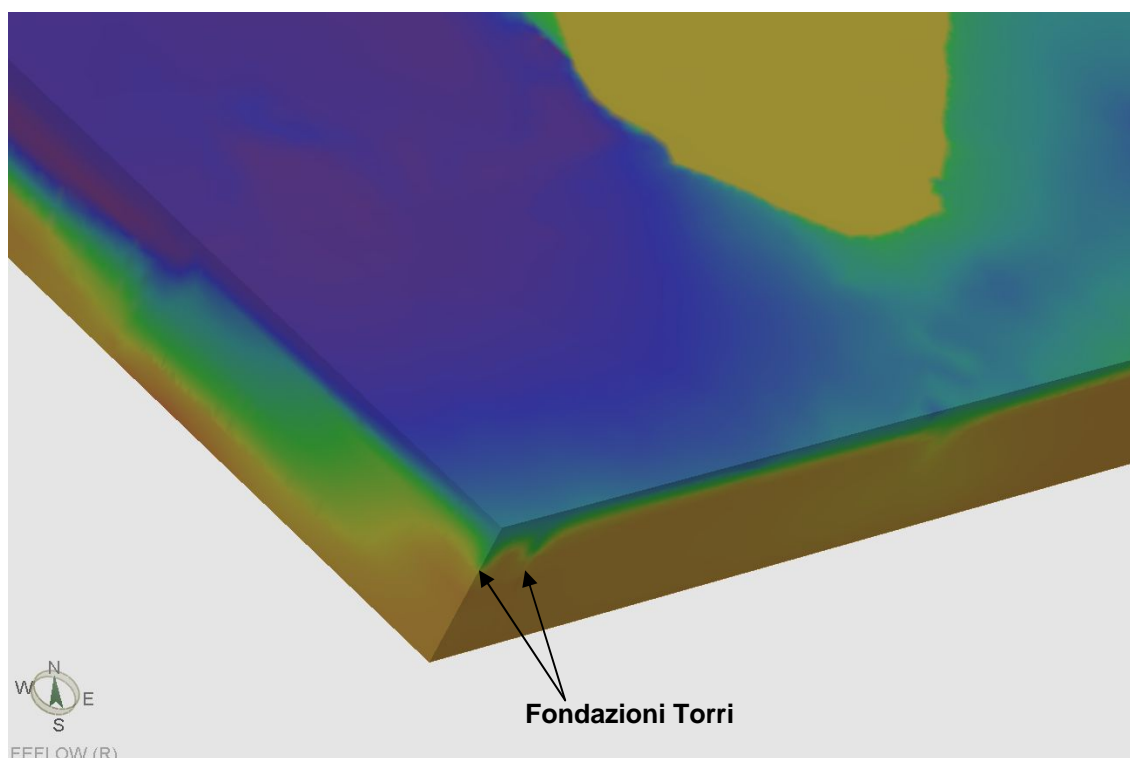


Figura 35. Vista tridimensionale della distribuzione delle concentrazioni calcolata nel dominio di flusso ampio nella simulazione di massimo: sezione del dominio di flusso nella zona delle fondazioni; legenda grafica in Figura 34 (esagerazione verticale 2:1).

In sintesi comunque l'emungimento è talmente vicino alla linea di costa che non va ad alterare significativamente la posizione del cuneo salino, ed agisce contemporaneamente da barriera idrodinamica per lo stesso cuneo che nella zona dei pozzi di fondazione non avanza verso l'entroterra.

In Figura 36 sono mostrate le stesse viste tridimensionali per la simulazione B, dove si può osservare l'effetto dell'emungimento di 4.2 l/s sulla distribuzione della salinità. Il richiamo di acqua salata dalla linea di costa e l'ispessimento della zona di transizione sono sensibilmente minori di quelli della simulazione A e quasi impercettibili. Anche in questo caso l'emungimento è talmente vicino alla linea di costa che non va ad alterare significativamente la posizione del cuneo salino, ed agisce contemporaneamente da barriera idrodinamica per lo stesso cuneo che nella zona dei pozzi di fondazione non avanza verso l'entroterra (Figura 37).

 Stretto di Messina		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

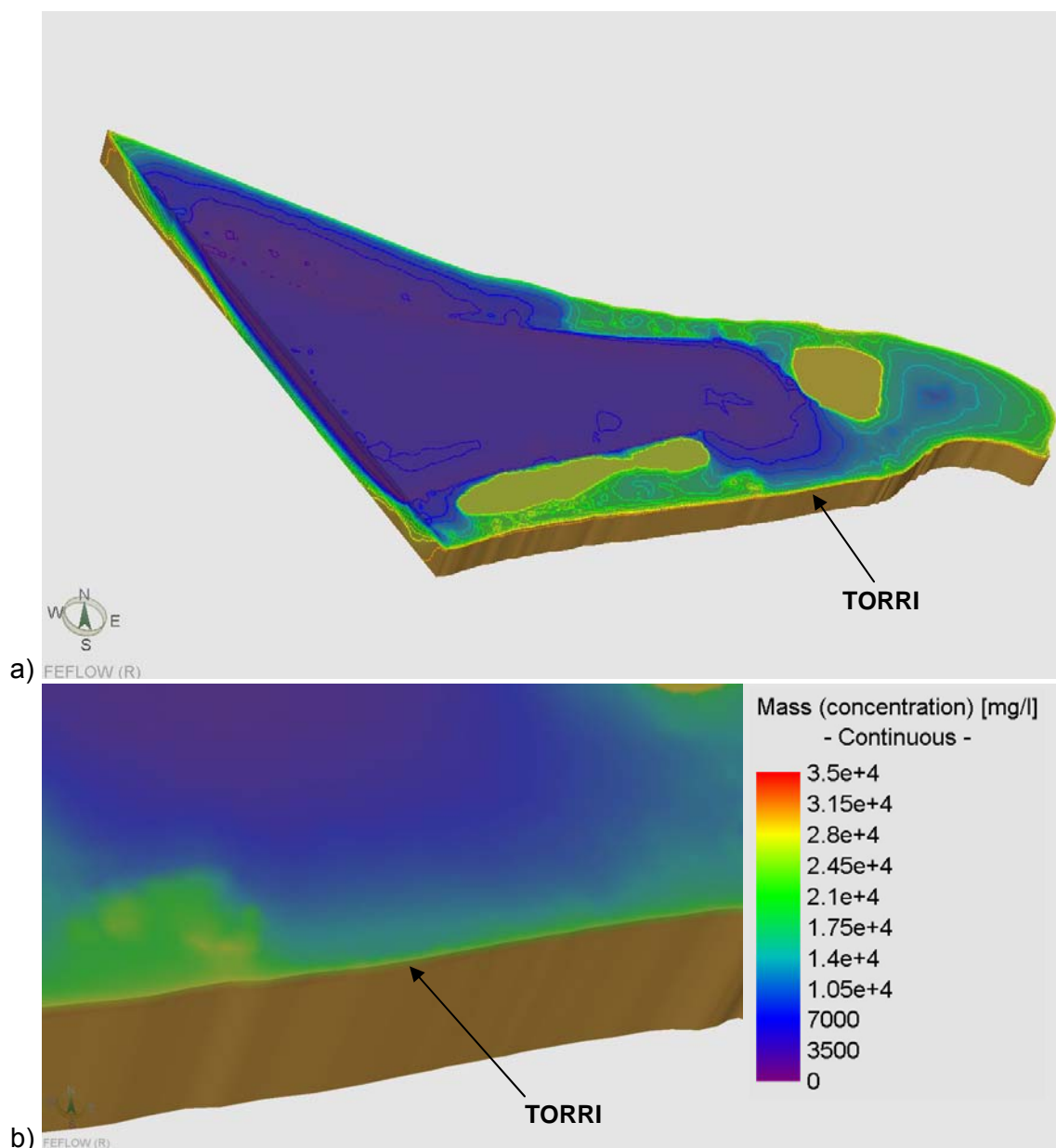


Figura 36. Vista tridimensionale della distribuzione delle concentrazioni calcolata nel dominio di flusso ampio nella fase di massimo emungimento - simulazione B (a); zoom sulla zona delle torri (b) (esagerazione verticale 2:1).

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

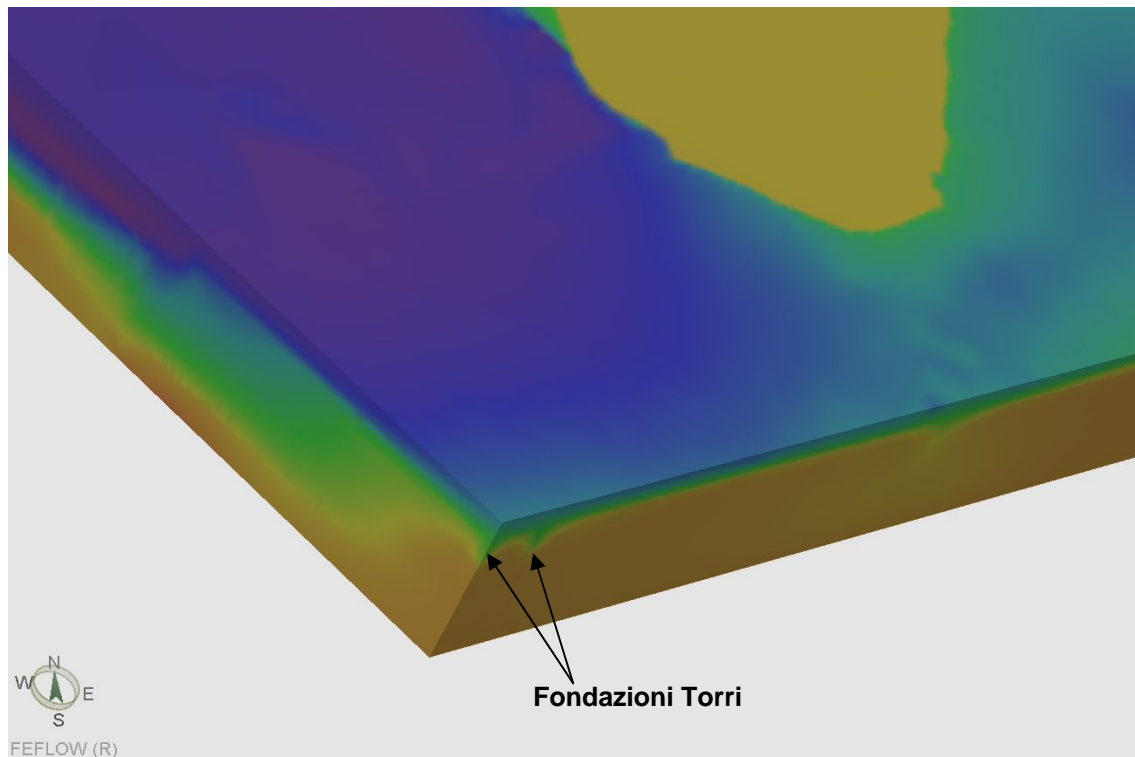


Figura 37. Vista tridimensionale della distribuzione delle concentrazioni calcolata nel dominio di flusso ampio nella fase di massimo abbattimento della falda - simulazione B: sezione NNE-SSO passante tra le due torri di fondazione; legenda grafica in Figura 36 (esagerazione verticale 2:1).

Per un confronto di maggior dettaglio dell'avanzamento del cuneo salino e dell'ispessimento della zona di transizione rispetto alla situazione originaria, in Figura 38 sono mostrate le linee di isoconcentrazione estratte dagli output del modello numerico lungo una sezione orientata NNE-SSO passante a metà delle due torri di fondazione, sia nella simulazione ante-operam, che nelle simulazioni A e B dopo 1 anno di estrazione di acqua.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;"><i>Rev</i></td> <td><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

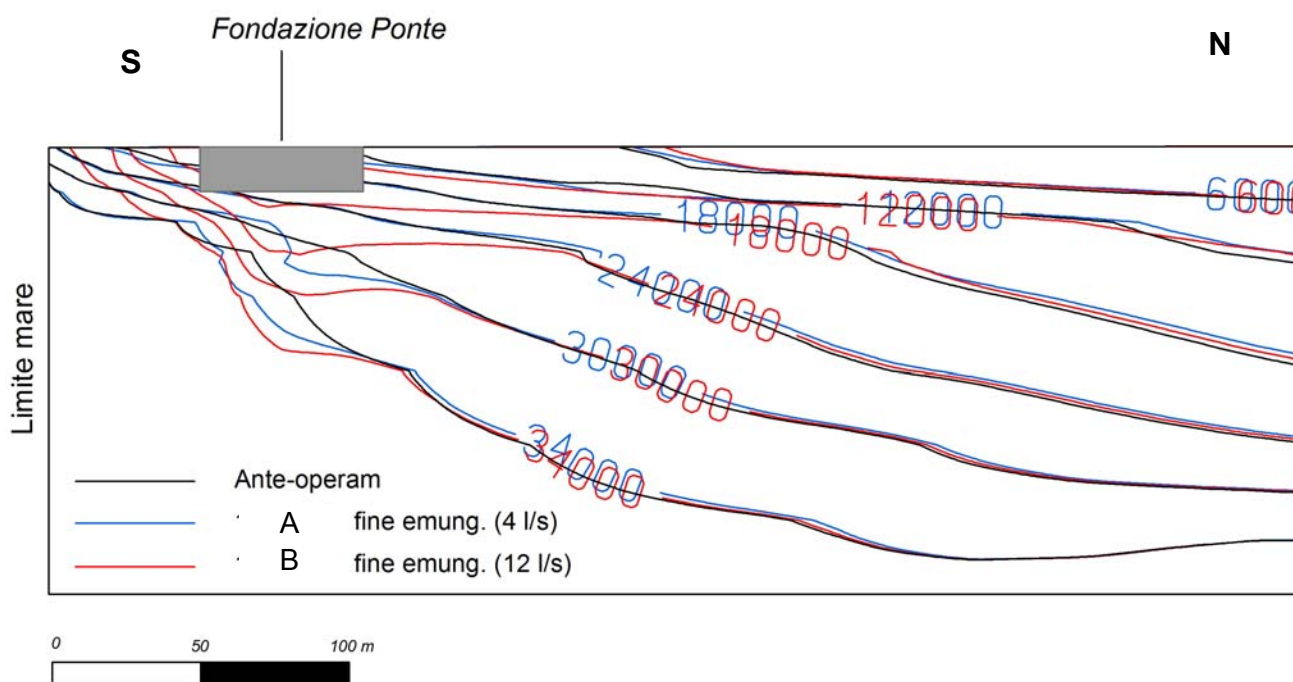


Figura 38. Sezione passante attraverso le due torri di fondazione con linee di isoconcentrazione salina nelle diverse simulazioni: ante-operam, A (fine pompaggio $k=10^{-6}$ m/s) e B (fine pompaggio $k=10^{-7}$ m/s); in grigio sono rappresentate le torri di fondazione; cfr. Figura 43 per l'ubicazione della sezione (traccia rossa).

L'impatto sulla distribuzione della salinità nell'area dei pozzi di fondazione è minimo. Nelle condizioni naturali il modello calcola per la zona delle torri di fondazione una salinità che varia da 12000 a 35000 mg/l. In entrambe le simulazioni questa sezione evidenzia quanto già visibile qualitativamente nelle viste 3D precedenti. Al di sotto della zona di estrazione dell'acqua le interfacce di salinità si approfondiscono leggermente (variazioni dell'ordine della decina di metri). L'effetto generale è quindi una dolciificazione dell'intorno delle strutture). Nella simulazione con tappo di fondo più permabile è decisamente maggiore il richiamo di acqua salata dal limite mare verso i pozzi di emungimento.

Verso l'entroterra la situazione rimane praticamente invariata. Ovviamente il debolissimo abbattimento dei gradienti idraulici dovuto al richiamo di acque dolci verso il pozzo determina qui un fenomeno inverso a quello che avviene in prossimità dei pozzi, ovverosia un innalzamento delle superfici di isosalinità più evidente a distanza di un centinaio di metri dalla posizione delle torri. Tale innalzamento però è percettibile a malapena e di ordine del decimetro o, al più di 1-2m. Un

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

aspetto piuttosto rilevante è che la situazione non varia sensibilmente al variare della portata emunta rimanendo nel range di permeabilità previsto per il tappo di fondo.

L'unico fenomeno che merita di essere segnalato, seppur piuttosto ovvio, vista la vicinanza della zona delle torri alla linea di costa, è quindi rappresentato dal fatto che le acque emunte nella zona delle pile saranno acque ad elevata concentrazione di sale.

Al fine di avere una visione più generale delle possibili alterazioni della salinità in falda durante il pompaggio sono state realizzate due sezioni da costa ionica a costa tirrenica che permettono di confrontare l'andamento delle linee di isosalinità nei tre casi di situazione ante-operam, e di estrazione d'acqua con portate di tipo A e B. L'ubicazione della sezioni è riportata in Figura 43, mentre i risultati sono visibili in Figura 39.

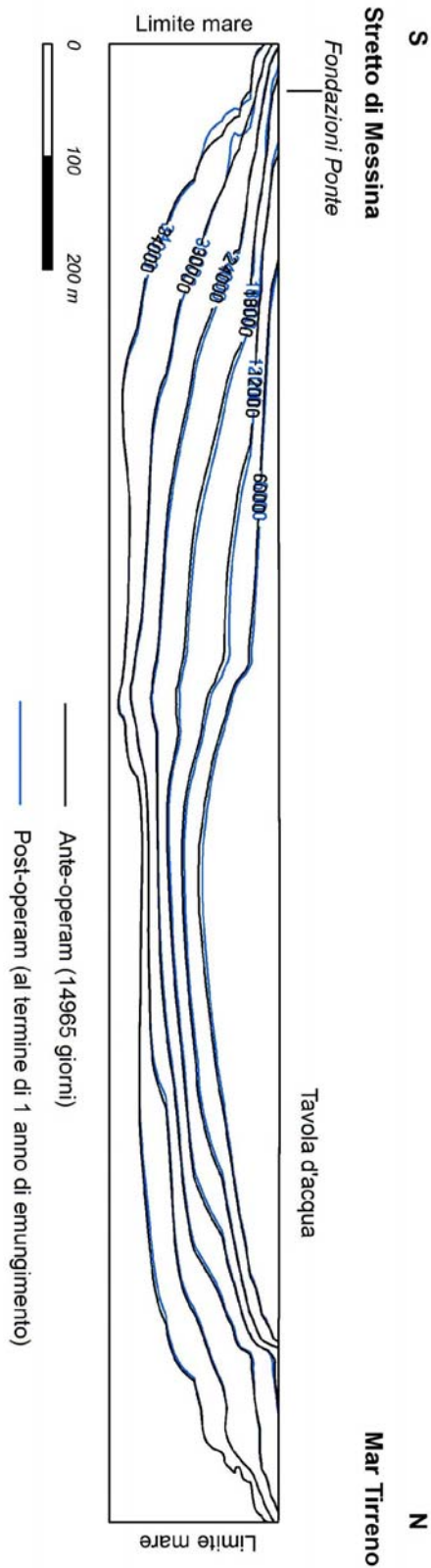


Figura 39. Sezione 1 tracciata dalla costa ionica (sinistra) alla costa tirrenica (destra) illustrante la distribuzione di salinità all'interno dell'acquifero prima del pompaggio (linee nere) e al termine del pompaggio con tappo di fondo a permeabilità del tappo di fondo $K=10^{-6}$ m/s (linee celesti)

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

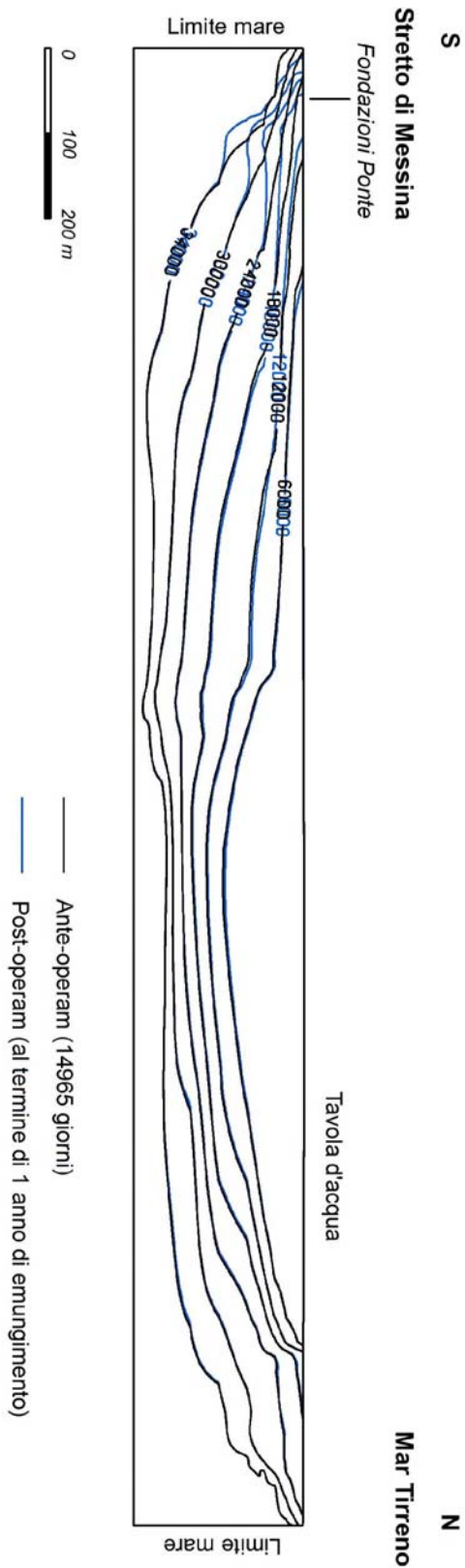


Figura 40. Sezione 1 tracciata dalla costa ionica (sinistra) alla costa tirrenica (destra) illustrante la distribuzione di salinità all'interno dell'acquifero prima del pompaggio (linee nere) e al termine del pompaggio con tappo di fondo a permeabilità del tappo di fondo $k=10^{-7}$ m/s (linee celesti).

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

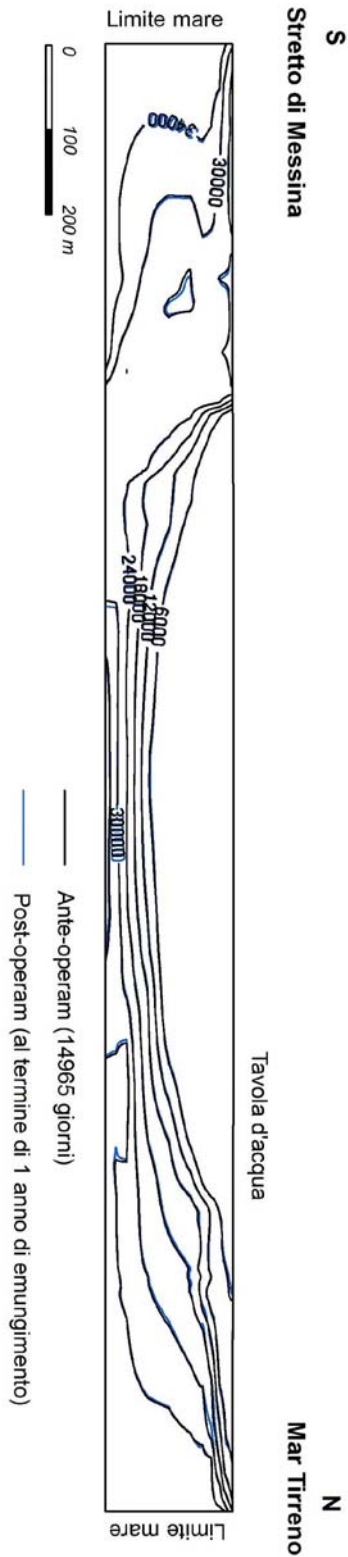


Figura 41. Sezione 2 tracciata dalla costa ionica (sinistra) alla costa tirrenica (destra) illustrante la distribuzione di salinità all'interno dell'acquifero prima del pompaggio (linee nere) e al termine del pompaggio con tappo di fondo a permeabilità del tappo di fondo $k=10^{-6}$ m/s (linee celesti).

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;"><i>Rev</i></td> <td style="width: 50%;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

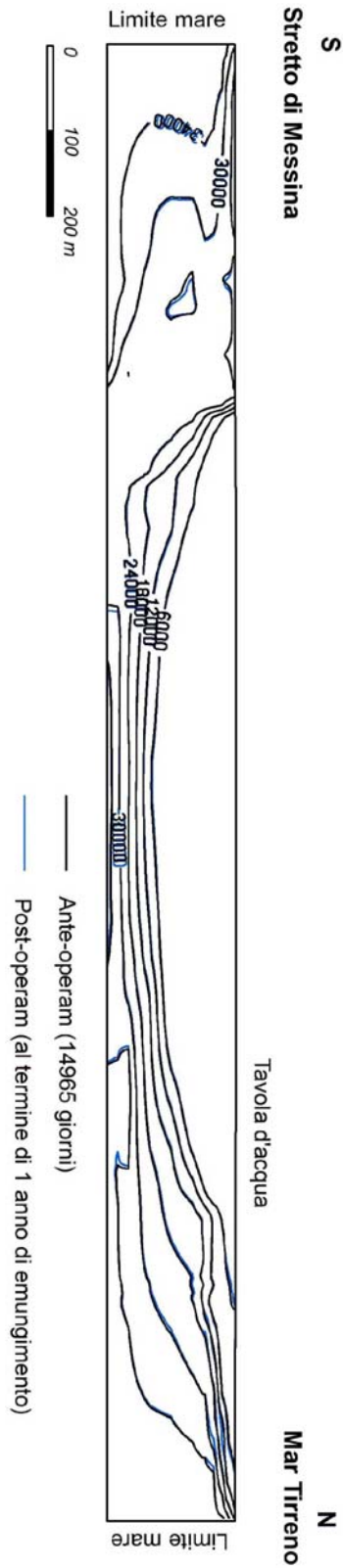


Figura 42. Sezione 2 tracciata dalla costa ionica (sinistra) alla costa tirrenica (destra) illustrante la distribuzione di salinità all'interno dell'acquifero prima del pompaggio (linee nere) e al termine del pompaggio con tappo di fondo a permeabilità del tappo di fondo $K=10^{-7}$ m/s (linee celesti).

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

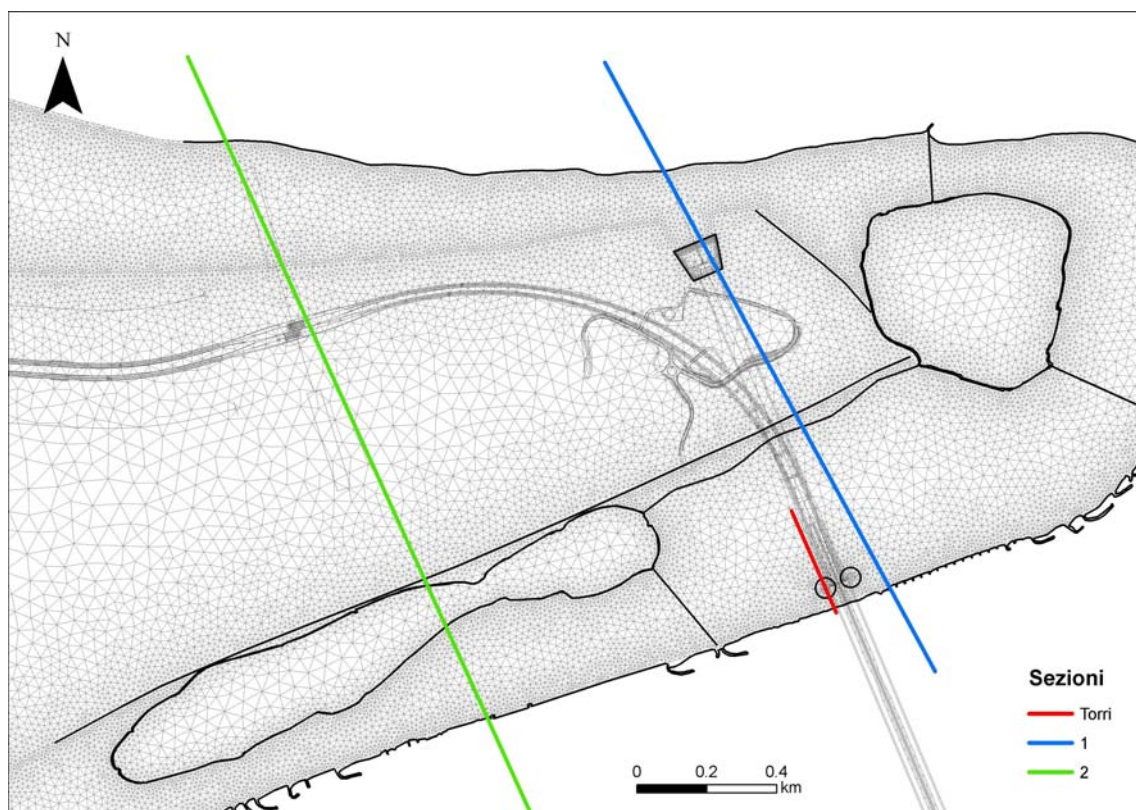


Figura 43. Ubicazione in pianta delle sezioni che illustrano le variazioni di salinità nell'acquifero in corso d'opera.

Le due immagini derivate da pompaggio con permeabilità diversa del tappo di fondo lungo la sezione 1 mostrano due situazioni praticamente identiche, ad eccezione che per il settore dei pozzi di fondazione di cui si è già parlato in precedenza (Figura 38). Il pompaggio in entrambe le configurazioni del tappo di fondo non ha praticamente alcuna influenza sulla distribuzione della salinità su grande scala. Gli innalzamenti delle linee di isosalinità che si osservano principalmente al di sotto della zona spartiacque tra le due coste sono di entità minima (dell'ordine del metro) e non determinano alcuna perturbazione della situazione naturale.

Sulle due immagini derivate da pompaggio con permeabilità diversa del tappo di fondo lungo la sezione 2, più lontana dalla zona dei pozzi di fondazione, gli effetti del pompaggio dopo 1 anno sono praticamente nulli. Sulla medesima sezione è anche possibile apprezzare il fatto che la falda al di sotto del pantano Grande non subisce variazioni di salinità.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

4.5.5 Considerazioni sugli effetti di marea

Il modello numerico realizzato aveva come punto di minimo potenziale la superficie del mare, che è stata collocata alla quota standard di 0m. Questa superficie di minimo potenziale tuttavia non è fissa, a causa della presenza degli effetti di marea e verosimilmente anche degli effetti delle correnti presenti lungo lo stretto. Analogamente la superficie idrica dei Pantani è soggetta ad effetti di oscillazione di marea e verosimilmente a contemporanei effetti di flusso e riflusso di acqua di mare attraverso i canali che li collegano al mare stesso.

L'inserimento delle oscillazioni tidali nel modello numerico non è stata prevista, per i seguenti motivi:

- Esso è un fenomeno complesso e disarmonico, difficile da simulare, se non semplificandolo attraverso una funzione numerica (unica via per inserirlo nel modello); in questo modo però si rischierebbe di introdurre nel modello delle incertezze difficilmente controllabili.
- In letteratura esistono pochissimi esempi di simulazione numerica di acquiferi costieri realizzati tenendo conto dell'effetto di marea e tra quelli noti agli scriventi alcuni non tengono in conto della salinità (es. Del Frate et al., 2006) oppure sono modelli bidimensionali e non tridimensionali come per il caso in esame (es. Dausman & Langevin, 2002, La Licata et al., 2007); la tematica rappresenta dunque un problema in corso di sviluppo e senza soluzioni ragionevolmente affidabili anche in ambito di ricerca scientifica.
- L'introduzione di funzioni che implicino una variabilità di carico e massa come condizioni al contorno del modello avrebbe determinato un incremento significativo dei tempi di calcolo, non compatibile con le tempistiche del progetto.
- Per gli scopi del presente studio la soluzione a carico fisso fornisce comunque delle risposte ragionevolmente affidabili per il problema in esame, ove l'obiettivo principale è quello di comprendere in linea generale quelle che potranno essere le conseguenze a grande scala dell'emungimento indotto dallo scavo delle fondazioni; una calibrazione molto raffinata a questo scopo non è necessaria; le pubblicazioni esistenti in materia, tra cui quelle precedentemente citate, dimostrano infatti che sicuramente l'opzione a carico fisso può introdurre degli scostamenti dalla realtà, ma questi scostamenti non implicano mai la definizione di scenari di molto diversi da quelli reali.

Vale comunque la pena fare alcune considerazioni per valutare se le oscillazioni tidali possano avere qualche effetto significativo sui risultati ottenuti con le modellizzazioni numeriche.

L'effetto di marea come noto non può essere approssimato ad una funzione regolare, poiché è un effetto che varia in maniera non armonica. Le perturbazioni di gradiente prodotte nell'acquifero per

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

effetto dell'innalzamento del livello d'acqua lungo la linea di costa si possono propagare all'interno dell'acquifero costiero in modo più o meno accentuato a seconda di diversi parametri caratteristici sia dell'acquifero, sia del ciclo di marea. Jacob (1950) ha fornito una funzione che permette di stimare fino a che distanza si possono propagare le perturbazioni all'interno di un acquifero costiero e che entità esse possano avere. La funzione è la seguente:

$$H_x = H_0 \exp\left(-x\sqrt{\pi S / t_0 T}\right)$$

Dove H_x è l'ampiezza della fluttuazione della falda all'interno dell'acquifero alla distanza x (riferita alla quota 0m); t_0 è il tempo che intercorre tra un massimo ed un minimo; S è il coefficiente di immagazzinamento; T è la trasmissività; H_0 è la semi-ampiezza delle oscillazioni del ciclo tidale, ossia:

$$(H_{\max} + H_{\min}) / 2$$

dove H_{\max} è la massima altezza di marea considerata e H_{\min} è la minima altezza di marea considerata (si utilizza una somma algebrica poiché H_{\min} è un valore negativo).

Naturalmente le variazioni indotte dalle maree nell'acquifero variano in modo molto complesso nel tempo. Tuttavia, disponendo di dati mareografici, attraverso la precedente formula di Jacob (1950) è possibile valutare, in funzione di un ciclo di maree medio, quali possono essere i disturbi indotti a varie distanze dalla costa all'interno dell'acquifero e fare alcune considerazioni su quanto essi possano indurre degli scostamenti rispetto alla situazione modellizzata numericamente.

Nel caso della zona in esame si può fare riferimento ai dati del mareografo di Messina tratti dalla banca dati ISPRA disponibile on-line (<http://www.mareografico.it/>). Il diagramma che segue riporta la serie di dati registrata dal mareografo per l'anno 2009, che è quella più completa disponibile.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

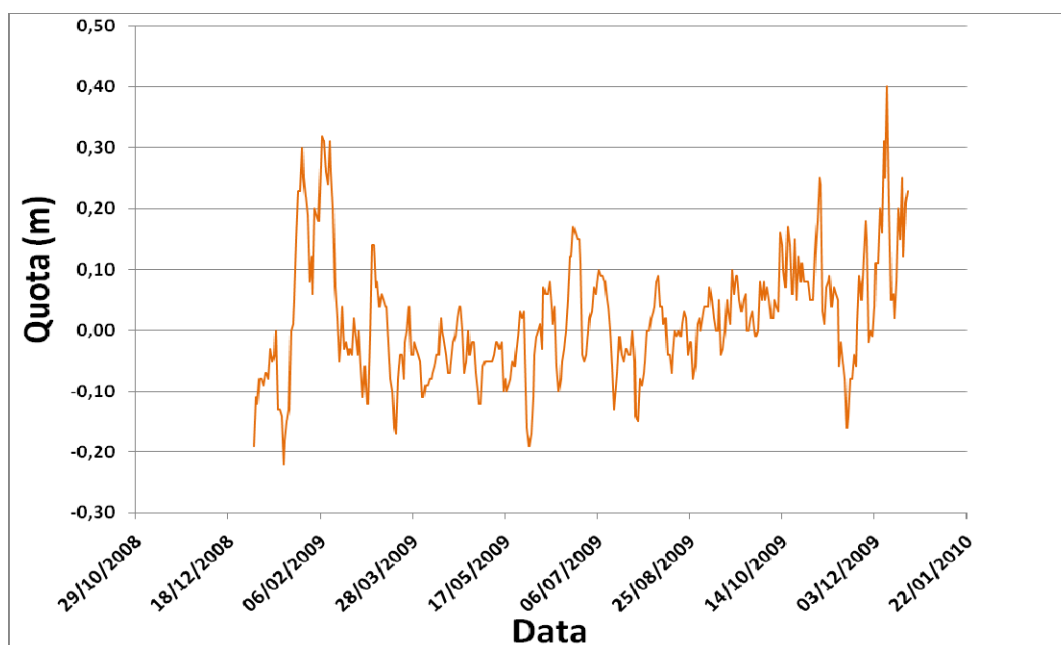


Figura 44: Oscillazioni tidali registrate dal mareografo di Messina per l'anno 2009; dati medi giornalieri.

Nel periodo considerato, il livello marino ha oscillato mediamente tra i ± 0.20 m rispetto ad un valore medio di riferimento di 0.05 m, con picchi di ± 0.25 m nel mese di Febbraio 2009 (il picco di Gennaio 2010 è stato escluso poiché è un valore piuttosto eccezionale ed ha una durata minima ridotta, poco significativa ai fini della perturbazione di falda).

Una variazione indotta dalle maree deve essere registrata anche dal livello d'acqua dei Pantani. In questo caso non sono stati rinvenuti dati storici, tuttavia, per il periodo dell'autunno 2010 sono disponibili i dati rilevati dal monitore ambientale. Il grafico che segue mostra la variazione del livello marino e dei Pantani nel periodo di cui sopra.

Un primo aspetto che sembrerebbe emergere dal diagramma è che il livello d'acqua dei Pantani sarebbe quasi sempre superiore rispetto a quello del mare, di 10-15 cm nel caso del Lago di Faro e di 5-10 cm nel caso del Lago di Ganzirri. Una situazione di questo tipo implicherebbe un perenne deflusso di acqua dai laghi verso il mare, cosa che però, dalle informazioni raccolte e dalle notizie bibliografiche appare inverosimile, poiché è certo che i canali abbiano come scopo principale quello di permettere afflusso di acqua da mare al fine di ossigenare le acque dei laghi e diminuirne la temperatura in periodo estivo.

Considerati tuttavia i ridotti scarti verticali tra i tre livelli d'acqua appare assai verosimile che essi rientrino nei margini d'errore della definizione, attraverso metodi topografici, della quota di 0m. Ciò suggerisce pertanto di utilizzare i dati di cui sopra esclusivamente per eseguire un confronto

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Rev</i></th> <th><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

relativo tra i livelli, mentre un confronto assoluto deve essere escluso.

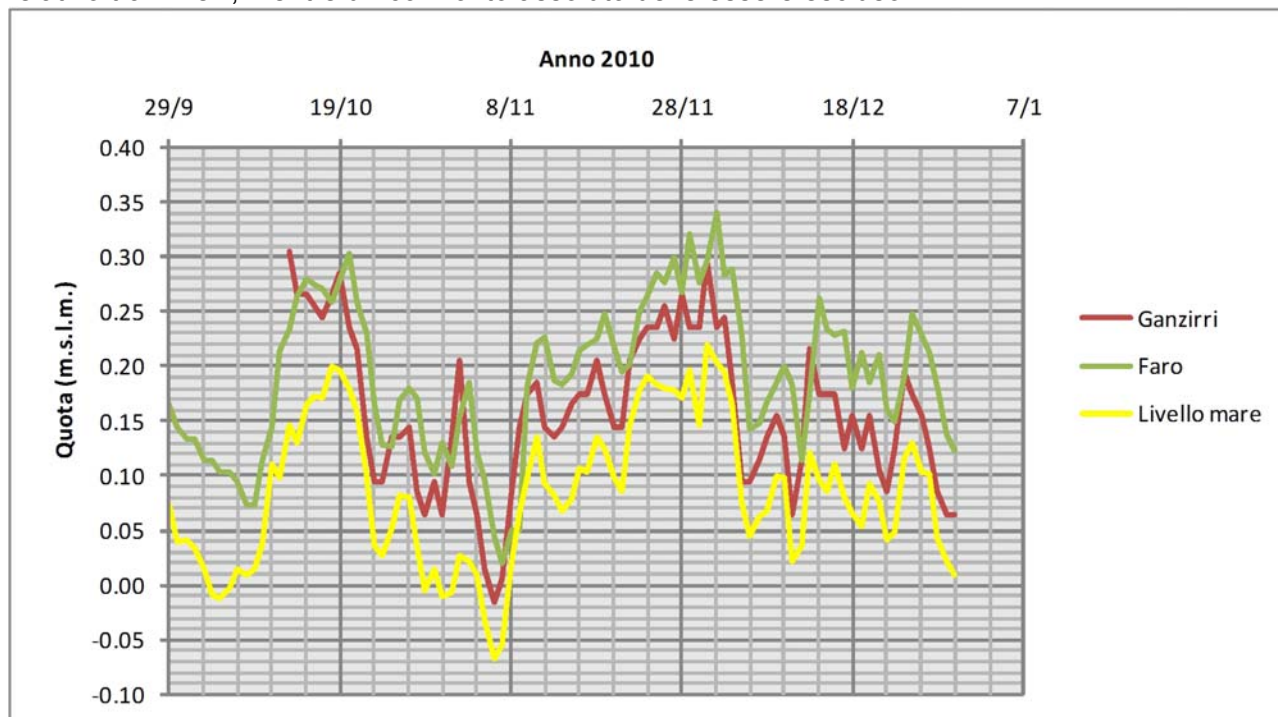


Figura 45: Confronto tra le oscillazioni del livello della superficie libera dei Pantani e del mare; le serie relative ai Pantani rappresentano dei dati medi giornalieri derivati dai rilievi del monitore ambientale; la serie relativa al mare riporta dei dati medi giornalieri forniti dal mareografo ISPRA di Messina.

Per quanto attiene al confronto relativo tra i dati, emerge che le oscillazioni del livello d'acqua nei laghi e nel mare sono grossomodo in fase, pur essendoci frequenti scostamenti minori da questa regola. Il Lago di Faro in particolare presenta un sistematico ritardo di circa 1 giorno rispetto alle oscillazioni marine, mentre per il Lago di Ganzirri tale ritardo è pure presente ma meno regolare e meno frequente. Le ragioni di tali sfasamenti possono essere varie, ma quella più probabile appare essere una inerzia allo svuotamento e riempimento determinata dalla limitata possibilità di flusso d'acqua lungo i canali di collegamento al mare, che hanno una sezione piuttosto ridotta.

Il grafico della figura precedente testimonia comunque che la falda dell'acquifero costiero, è sottoposta a variazioni di carico determinate sia dalle oscillazioni del livello dei Pantani, sia da oscillazioni del livello marino.

Sulla base di questi dati è stato possibile stimare le variazioni indotte nell'acquifero costiero sfruttando la funzione proposta da Jacob (1950). La stima delle variazioni è rappresentata nel diagramma successivo

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Per quanto attiene alle oscillazioni indotte dalle variazioni di livello del mare, dal grafico si desume che a distanza di circa 50m dalla costa le oscillazioni indotte sono dell'ordine dei 10 cm, mentre a 100m si riducono a circa 6 cm. Se si considera il gradiente molto basso che la falda presenta nella piana costiera è evidente come tra la linea di costa ed una fascia dell'ordine indicativo dei 100-200m da quest'ultima l'effetto della marea possa avere una certa influenza sul deflusso in falda. In questa fascia i gradienti possono variare e talora anche invertirsi.

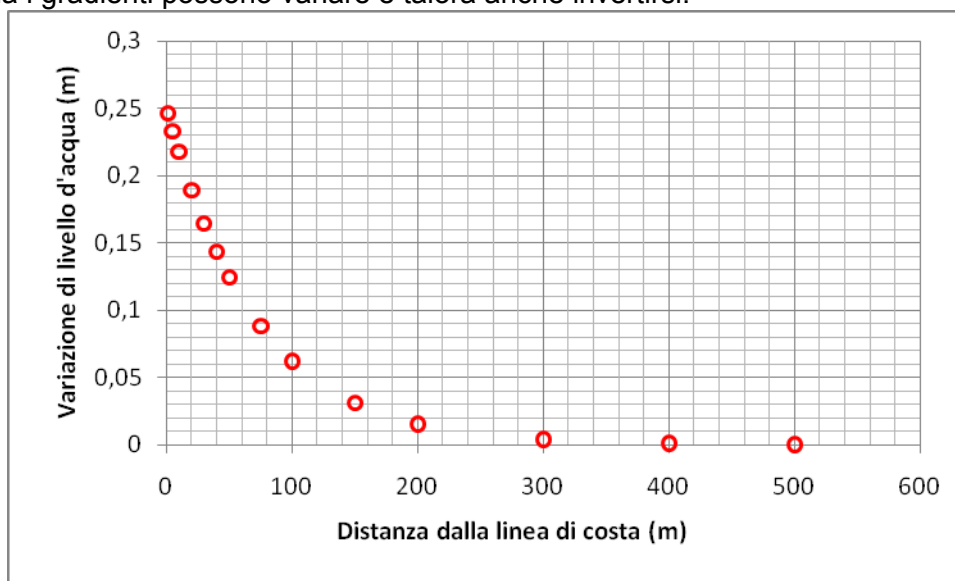


Figura 46: Variazioni di falda indotte nell'acquifero costiero dalle oscillazioni tidali calcolate attraverso la formula di Jacob; per l'acquifero è stata considerata cautelativamente la permeabilità dei depositi marini ($k=1 \times 10^{-4}$), che rappresentano la parte più superficiale e più permeabile dell'acquifero, e un loro spessore medio di circa 25m.; il coefficiente di immagazzinamento (S) è stato posto pari a 0,2; per le oscillazioni di marea è stata considerata un'ampiezza (H_0) di 25cm e un tempo di ricorrenza (t_0) di 15 giorni, valori che possono essere ritenuti rappresentativi.

A questo effetto determinato dal mare si potrebbe aggiungere anche quello determinato dai Pantani. E' però verosimile che in questo caso l'influsso sia minore, principalmente in ragione di una ridotta permeabilità del fondo di questi invasi, presumibilmente ricoperto da uno strato di depositi lacustri a granulometria fine.

Alla luce di queste considerazioni emerge in sostanza che in condizioni naturali esiste lungo la linea di costa, per una fascia di larghezza dell'ordine dei 100-200m, una zona in cui le oscillazioni di marea possono indurre una certa variabilità della concentrazione salina, con superfici di

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

isoconcentrazione che possono presentare una mobilità periodica dell'ordine del metro. Allo stesso modo in questa fascia esiste una variazione del livello d'acqua in falda che, nelle fasi di estrazione d'acqua dai pozzi di fondazione delle torri potrebbe determinare variazioni della portata emunta ed anche variazioni nella zona di alimentazione delle acque di falda che defluiscono verso i pozzi. Nell'acquifero costiero le superfici equipotenziali e la zona di influenza della depressione piezometrica indotta dall'estrazione di acqua potranno variare in funzione della fase di marea.

Per quantificare la variazione di portata potenziale e le oscillazioni delle superfici equipotenziali indotte dalle oscillazioni tidali in fase di pompaggio nell'intorno dei pozzi di fondazione sono state eseguite due simulazioni con condizioni di carico sul limite mare e sui limiti Pantani variate rispetto alla situazione originaria. In queste due simulazioni il carico idraulico sui due tipi di limiti è stato fatto variare in un primo caso innalzandolo di 0,25 m rispetto alla condizione standard simulata nel modello generale (0 m s.l.m.) e in un secondo caso abbassandolo di 0,25 m. Le simulazioni sono state protrate per 15 giorni, periodo indicativo della durata di un ciclo di oscillazione tidale. Le due simulazioni sono poi state confrontate con una simulazione di durata equivalente fatta in condizioni standard con carichi sui limiti posti a quota 0 m s.l.m.. Come permeabilità del tappo di fondo è stata considerata quella di riferimento progettuale di 10^{-7} m/s

I risultati sono illustrati graficamente in Figura 47, dove vengono confrontate le distribuzioni dei carichi piezometrici calcolate dal modello in fase di pompaggio. La figura mostra che nelle tre condizioni modellizzate si osservano modeste variazioni del carico piezometrico, dell'ordine dei 10 cm, esclusivamente nella zona della piana costiera. In tutta la piana e in tutte le condizioni il carico rimane comunque sempre superiore alla quota dei Pantani. L'equipotenziale 0,5m nel caso di alta marea è molto prossima alla linea di costa, mentre arretra nel caso di bassa marea. L'equipotenziale 0,6m invece è già coincidente in tutti e 3 i casi modellizzati.

Il confronto quantitativo delle portate emunte presso la zona delle torri (riassunto in Tabella 11) dimostra che le differenze di carico indotte dalla variazione delle maree non influiscono sull'output del modello in termini di volumi d'acqua estratta..

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

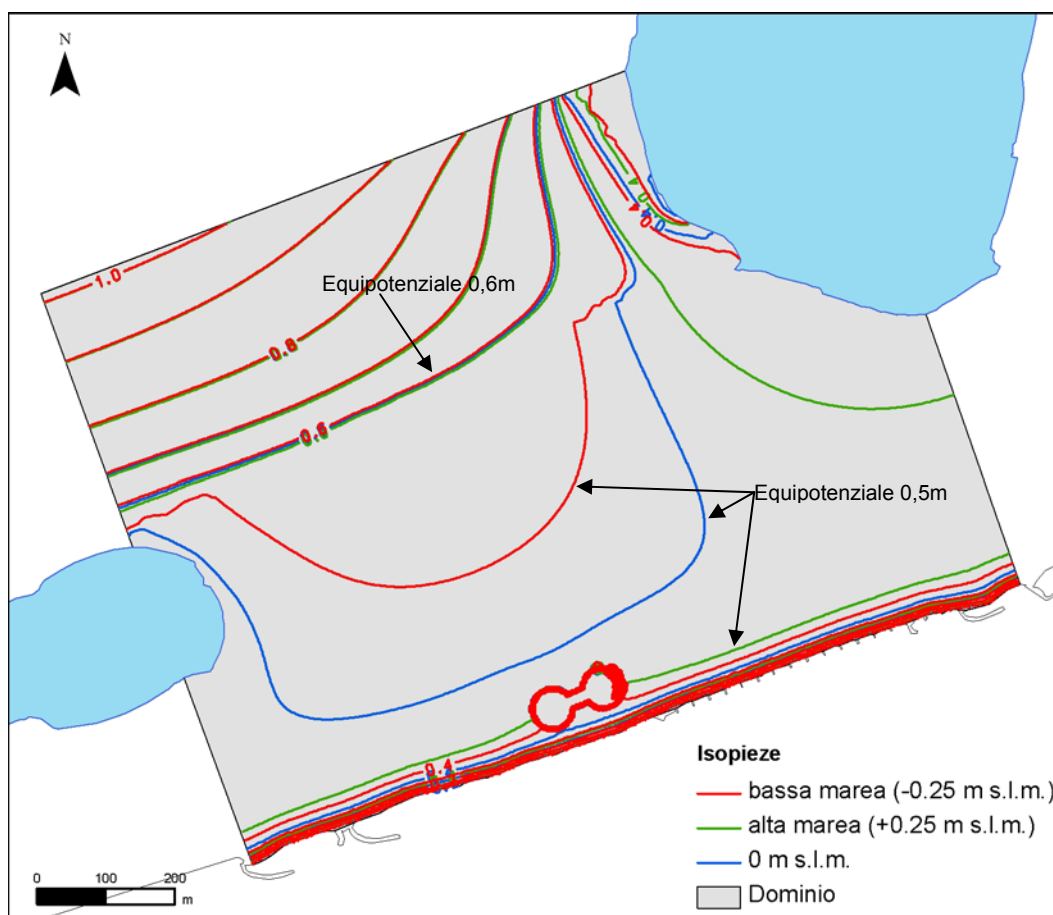


Figura 47. Distribuzione delle linee equipotenziali nella zona della piana compresa tra i due Pantani in condizioni di estrazione di acqua da -15m di profondità in corrispondenza dei pozzi di fondazione; i diversi colori rappresentano tre diverse situazioni di livello marino e consentono un confronto per le tre diverse situazioni; la figura è riferita ad un pompaggio protratto per 15gg.

Condizione al contorno	Bilancio netto (l/s)		
	Medio mare	Alta marea	Bassa marea
Limite mare	2.25	3.59	0.94
Emungimento pile	-3.26	-3.26	-3.25
Condizione 2° tipo - ricarica da NO	1.88	1.88	1.88
Ricarica zenitale	2.81	2.81	2.81

Tabella 11. Tabella di confronto dei bilanci sul dominio ristretto nelle 3 diverse situazioni di livello mare simulate.

Alla luce di questi dati inoltre è ragionevole concludere, anche in considerazione della ciclicità del fenomeno delle oscillazioni tidali, che non sono da attendersi variazioni significative nemmeno sul bilancio degli afflussi dalla falda verso i Pantani in corso di costruzione delle opere.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

5 Valutazioni velocità di diffusione di sostanze in falda

L'area dei Pantani sarà interessata dalla realizzazione di numerose opere che in parte costituiscono dei potenziali centri di immissione in falda di inquinanti. Le fasi di lavorazione più sensibili per la problematica della immissione di agenti inquinanti in falda sono indubbiamente rappresentate dalla realizzazione di opere che non comportano emungimento. Infatti nel caso di opere che avvengono con un contestuale emungimento (es. scavo di gallerie drenanti sotto falda), essendo il flusso di falda diretto verso l'opera, che costituisce un elemento di drenaggio, non è prevedibile una diffusione di eventuali sostanze utilizzate durante la lavorazione verso la falda.

Nell'area dei Pantani la maggior parte delle lavorazioni avviene senza emungimento, sia perché la maggior parte delle opere si attesta al di sopra della superficie di falda, sia perché gli scavi in falda avvengono perlopiù senza drenaggio (fa eccezione solo la fase di approfondimento degli scavi delle torri, con tutte le limitazioni al drenaggio più volte richiamate). Le operazioni che avvengono in assenza di emungimento sono le seguenti:

1. operazioni di approntamento ed esercizio delle aree di cantiere;
2. operazioni di pre-trattamento nella zona delle fondazioni delle torri;
3. operazioni di getto delle fondazioni nella zona delle fondazioni delle torri;
4. realizzazione dell'opera di ancoraggio;
5. realizzazione delle fondazioni del viadotto Pantano;
6. scavo delle gallerie ferroviarie e stradali.

Nel caso delle opere di cui ai punti 1, 4, 6 le lavorazioni avvengono sopra falda, quindi in zona insatura, pertanto l'eventuale impatto di immissione di inquinanti sarebbe in parte mitigato e rallentato dagli effetti di adsorbimento che si verificano in questo contesto. Negli altri casi le lavorazioni interessano direttamente la falda e pertanto una eventuale immissione di sostanze inquinanti avverrebbe direttamente in zona satura.

Per quanto riguarda i cantieri vi è da osservare che è previsto, nell'ambito del manuale di gestione ambientale dei cantieri, un sistema di raccolta e trattamento che impedisce la contaminazione delle falde.

La tipologia di inquinanti che possono venire immessi in falda è di vario tipo e di entità variabile; l'elenco successivo riporta le principali tipologie:

- Poliuretani e altri agenti chimici derivanti dall'utilizzo di resine bi-componenti e mono-componenti per l'impermeabilizzazione (in sede di Progetto Definitivo non se ne è previsto l'impiego, adottando miscele cementizie bi-componenti acqua/cemento, con bentonite ed

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

eventuali additivi); tali sostanze sono comunque stabili;

- Nitrati e ammonio derivanti dall'uso di esplosivi (anch'essi non previsti in Progetto Definitivo);
- Idrocarburi sversati accidentalmente durante le lavorazioni;
- Inquinanti biologici derivanti da aumento di carico antropico nelle aree di cantiere;
- Variazioni di chimismo in falda per l'utilizzo di cementi e bentonite.

Quest'ultimo punto in particolare merita una discussione più approfondita poiché ovviamente i cementi e le miscele bentonitiche sono tra le sostanze più utilizzate nell'ambito della realizzazione delle opere, ed in particolare per la realizzazione delle opere propedeutiche allo scavo delle fondazioni delle torri, che rappresentano le opere più prossime ai Pantani.

Il cemento di per se stesso non è da considerarsi una sostanza problematica dal punto di vista dell'inquinamento. Il suo effetto principale in acqua può essere quello di generare acque alcaline, con pH basso nell'intorno della zona di intervento. Tali acque, proprio a causa della forte variazione di pH rispetto a quello naturale possono generare precipitazione di specie solide (soprattutto carbonatiche) nella porzione di acquifero "sotto flusso" rispetto alle opere. Si potrà quindi sviluppare nell'acquifero un pennacchio di riduzione della trasmissività, che però normalmente è circoscritto ad una zona piuttosto limitata nell'intorno dell'opera. Assieme al cemento possono essere immesse in acqua altre sostanze usate come additivi, tra le quali la più comune è il silicato di sodio, che però è una molecola poco inquinante e anzi talora utilizzata per potabilizzare l'acqua. Tuttavia questa sostanza può dare origine a incremento della silice disciolta. Ancora una volta comunque le problematiche di alterazione di chimismo di cui sopra sono significative soltanto per opere realizzate sotto falda e in condizioni non drenanti.

Per quanto attiene alla bentonite, non è da considerarsi un elemento inquinante. Essa può originare fenomeni di adsorbimento di alcuni cationi disciolti in acqua, quali ad esempio Na^+ , tuttavia si tratta di fenomeni molto localizzati e transitori.

Di conseguenza si può ritenere che cemento e bentonite non rappresentino un reale problema, generando fenomeni assai circoscritti nel tempo e nello spazio.

La diffusione degli inquinanti è un fenomeno estremamente complesso da modellizzare che implica la conoscenza di dettaglio di alcune proprietà tipiche del mezzo poroso acquifero (es. dispersività) ma anche di proprietà tipiche dell'inquinante (coefficiente di diffusione molecolare, concentrazione ecc.), che però possono variare considerevolmente da caso a caso. Il problema è ancora più complesso quando si prenda in considerazione la modellizzazione in zona insatura, poiché in questo caso subentrano aspetti ulteriori, quali i processi di adsorbimento, scambio ionico ecc.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

Alla luce di queste considerazioni è evidente che non è possibile eseguire stime di diffusione degli inquinanti sufficientemente dettagliate ma allo stesso tempo valide per diversi possibili tipi di inquinanti e concentrazioni. Per contro, in questo capitolo vengono fornite delle indicazioni su quella che può essere il tempo di transito di particelle in falda che, con ragionevole approssimazione può essere approssimato al tempo di transito di un inquinante. Queste stime sono comunque stime cautelative, perché prevedono che l'inquinante si comporti come il mezzo acquoso e non tengono in considerazione i possibili effetti di mitigazione della zona insatura, che pure possono essere molto importanti nel ritardare o addirittura bloccare la diffusione degli inquinanti.

Il modello numerico 3D ottenuto per la zona dei Pantani consente, mediante la funzione "particle tracking", di valutare le traiettorie e le velocità di spostamento di particelle immesse in falda in punti pre-determinati. Sfruttando questa funzione sono state eseguite simulazioni di tracciamento per differenti potenziali siti di immissione di inquinanti collegati alla realizzazione delle opere. In particolare sono state valutate due situazioni:

- i) tempo di transito in condizioni di flusso non perturbate dall'emungimento determinato dallo scavo delle fondazioni delle torri;
- ii) tempo di transito in condizioni perturbate.

La condizione (i) è utile per stimare il rischio di eventuali inquinamenti associati ad opere che verranno realizzate prima dello scavo delle fondazioni delle torri, mentre la condizione (ii) è utile per simulare la situazione delle opere che vengono realizzate durante lo scavo delle fondazioni, nella fase di massimo abbattimento piezometrico all'interno dei pozzi di scavo.

In entrambe le simulazioni sono stati presi in considerazione i seguenti centri potenziali di contaminazione (Figura 48 e Figura 49):

1. tre siti lungo lo sviluppo del viadotto Pantano per tenere in conto la realizzazione delle fondazioni;
2. area di cantiere dell'opera di ancoraggio;
3. sei siti lungo lo sviluppo delle gallerie stradali;
4. nove siti lungo lo sviluppo delle gallerie ferroviarie;
5. area di cantiere nell'intorno delle fondazioni delle torri.

Le simulazioni di tracciamento sono illustrate nelle figure che seguono, mentre le distanze di migrazione e le relative velocità a 10 anni dallo sversamento in falda sono presentate in Tabella 12.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

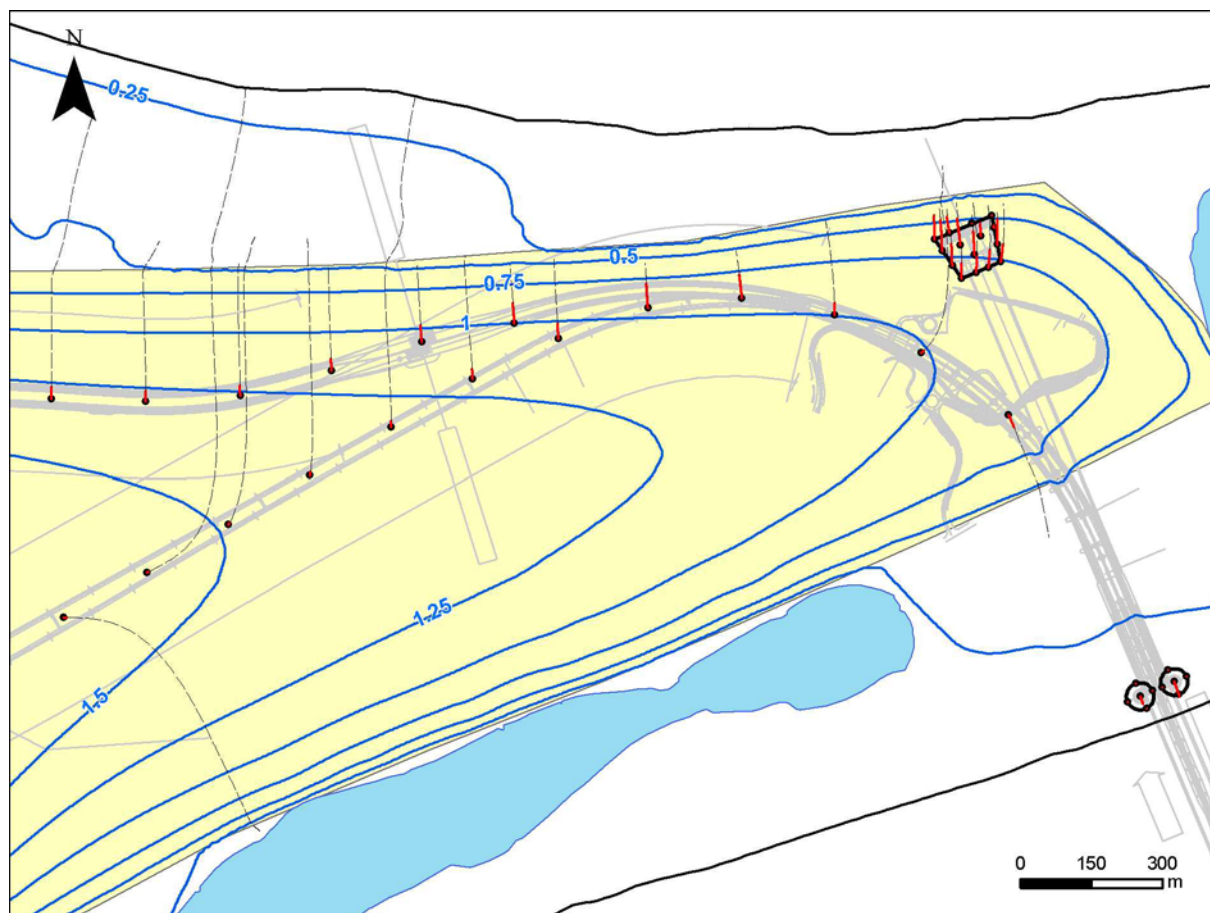


Figura 48. Ubicazione dei punti di simulazione della propagazione in falda per la condizione ante-operam; in rosso i percorsi entro i 10 anni; in nero tratteggiato le linee di flusso che possono essere assunte come indicatori dei percorsi a lunghissimo termine; in giallo il limite di affioramento delle Sabbie e Ghiaie di Messina; si noti come alla scala di rappresentazione in numerosi punti sembra quasi non esserci movimento e i percorsi appaiano come dei puntini rossi.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

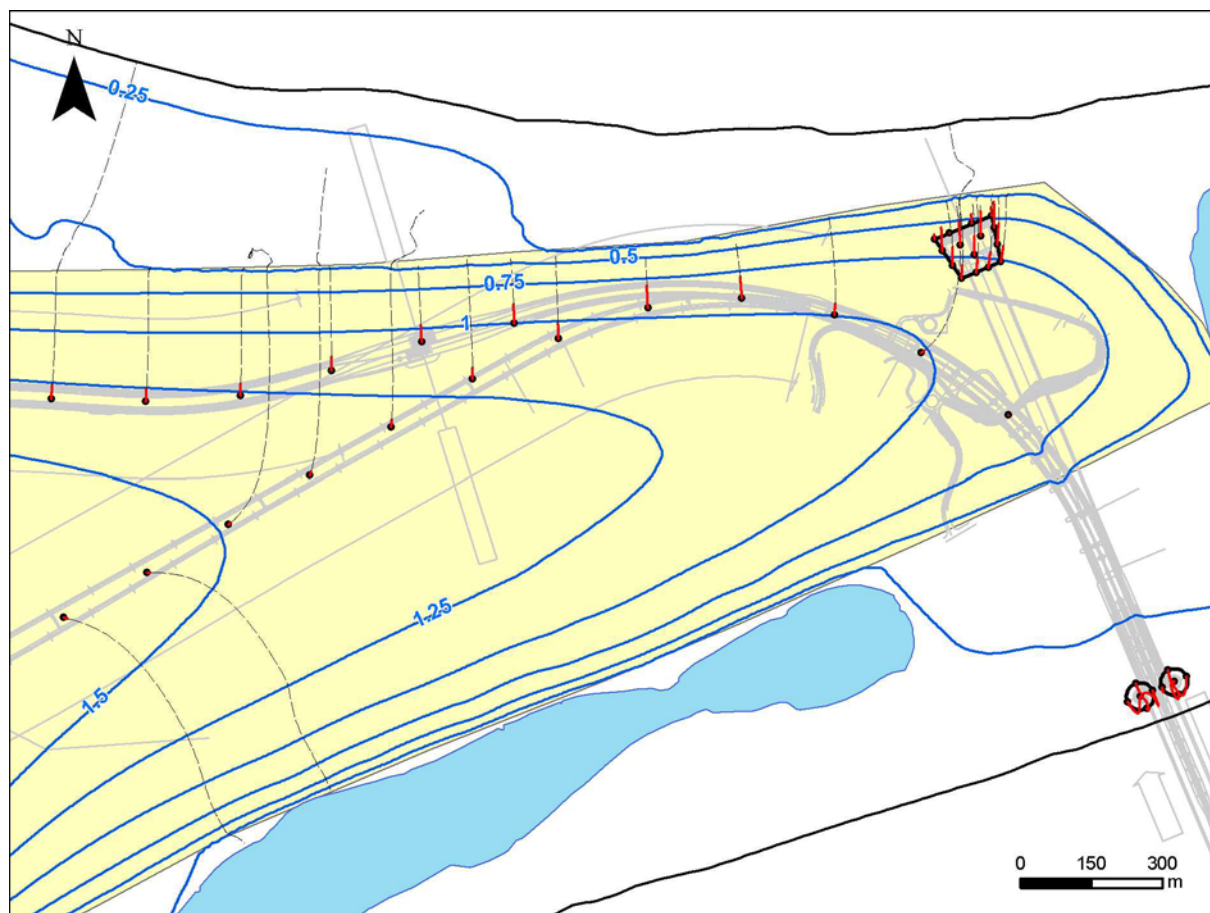


Figura 49. Ubicazione dei punti di simulazione della propagazione in falda per la condizione in corso d'opera; in rosso i percorsi entro i 10 anni; in nero tratteggiato le linee di flusso che possono essere assunte come indicatori dei percorsi a lunghissimo termine; in giallo il limite di affioramento delle Sabbie e Ghiaie di Messina; si noti come alla scala di rappresentazione in numerosi punti sembra quasi non esserci movimento e i percorsi appaiono come dei puntini rossi

Prima di analizzare con dettaglio le situazioni simulate, vale la pena ricordare che le simulazioni sono da considerarsi estremamente conservative in quanto prendono in considerazione solamente il principale tra i processi di trasporto e diffusione dei contaminati in falda e cioè l'advezione. Non vengono considerati altre componenti del trasporto quali la dispersione, la diffusione e l'adsorbimento dei contaminati che ritardano e/o diminuiscono la propagazione in falda. Nonostante queste assunzioni estremamente conservative, la ridotta conducibilità idraulica delle Sabbie e Ghiaie di Messina genera velocità di propagazione talmente basse da rendere quasi non apprezzabile in carta la lunghezza dei percorsi compiuti in 10 anni.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

ID particella	ante-operam (m)	v (m/anno)	corso d'opera (m)	v (m/anno)
1	28.86	2.886	0.04	0.004
2	7.70	0.770	8.43	0.843
3	25.15	2.515	24.49	2.449
4	49.37	4.937	45.57	4.557
5	51.05	5.105	47.47	4.747
6	32.47	3.247	32.31	3.231
7	20.57	2.057	23.14	2.314
8	13.42	1.342	15.49	1.549
9	8.02	0.802	8.70	0.870
10	5.07	0.507	5.60	0.560
11	4.38	0.438	6.20	0.620
12	5.83	0.583	8.46	0.846
13	24.74	2.474	28.98	2.898
14	22.42	2.242	26.29	2.629
15	21.92	2.192	26.02	2.602
16	26.39	2.639	29.91	2.991
17	35.89	3.589	35.66	3.566
18	43.86	4.386	41.50	4.150
19	33.22	3.322	29.77	2.977
20	51.37	5.137	11.35	1.135
21	0.04	0.004	18.12	1.812
22	39.18	3.918	34.57	3.457
23	65.76	6.576	49.41	4.941
24	46.25	4.625	38.52	3.852
25	35.13	3.513	0.03	0.003
26	0.09	0.009	20.52	2.052
27	5.55	0.555	55.90	5.590
28	54.27	5.427	44.43	4.443
29	35.26	3.526	31.39	3.139
30	37.05	3.705	32.82	3.282
31	57.76	5.776	50.15	5.015
32	26.48	2.648	52.60	5.260
33	50.07	5.007	41.38	4.138
34	3.37	0.337	0.01	0.001
35	3.88	0.388	0.02	0.002
36	5.90	0.590	21.38	2.138
37	4.55	0.455	70.23	7.023
38	3.46	0.346	42.85	4.285
39	3.36	0.336	90.26	9.026
40	3.40	0.340	10.55	1.055
41	3.23	0.323	25.28	2.528
42	3.62	0.362	79.98	7.998
43	4.30	0.430	51.92	5.192

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Tabella 12. Distanze di migrazione di un ipotetico contaminante a 10 anni dallo sversamento in falda e velocità medie di migrazione per i centri potenziali di contaminazione individuati (gli ID particella sono mostrati nelle figure seguenti).

5.1 Aree di cantiere del viadotto Pantano

Questa simulazione considera punti di immissione in falda localizzati lungo il tracciato del viadotto Pantano, interessato dalle aree di cantiere necessarie alla realizzazione delle opere di fondazione. I percorsi di migrazione sono stati calcolati a partire da 3 punti di potenziale contaminazione sia in condizioni ante-operam sia in corso d'opera durante la realizzazione delle torri di fondazione del ponte (Figura 50 e Figura 51).

In condizioni ante-operam le particelle immesse in falda in 10 anni coprono distanze comprese tra 28.9 e 7.7 m rimanendo entro l'areale di affioramento delle Sabbie e ghiaie di Messina. Le velocità di transito risultano comprese tra 2.9 e 0.8 m/anno (Tabella 12).

Durante la realizzazione delle opere di fondazione delle torri, il drenaggio delle acque sotterranee necessario alla realizzazione delle opere, induce un aumento della distanza di transito in corrispondenza del punto 2, mentre nei punti 1 e 3 si registra una diminuzione (Figura 51). In particolare nel punto 1 questo è dovuto all'effetto barriera indotto dalle fondazioni del viadotto sul campo di moto della falda. In corso d'opera le distanze di migrazione a 10 anni sono comprese tra 24.5 e 0.04 m, migrazione mentre le velocità risultano comprese tra 2.5 e 0.004 m/anno (Tabella 12).

I percorsi ed i tempi di migrazione calcolati non evidenziano particolari criticità connesse alla realizzazione delle opere di fondazione del viadotto Pantano.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

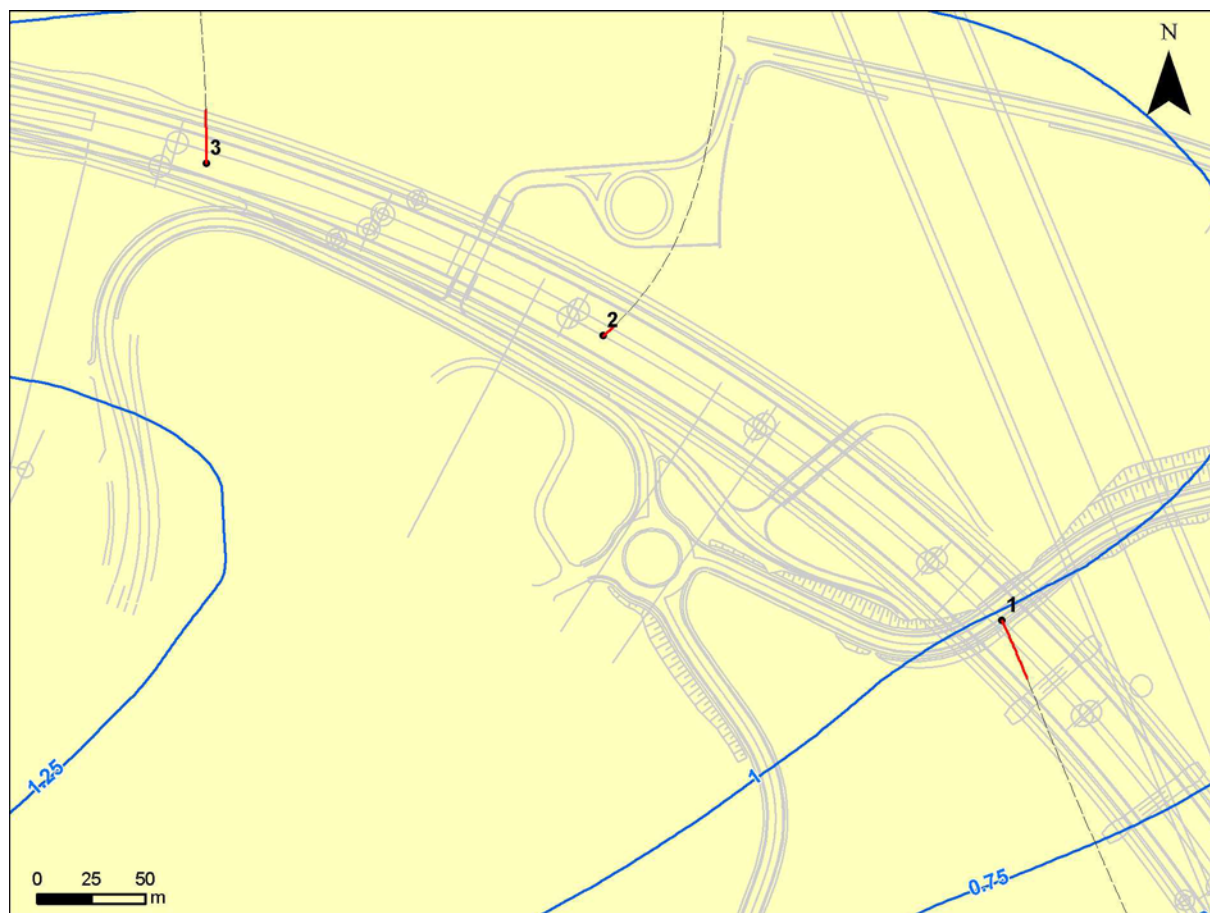


Figura 50. Ubicazione dei punti di simulazione della propagazione in falda per il Viadotto Pantano per la condizione ante-operam; in rosso i percorsi entro i 10 anni ed in nero i percorsi oltre i 10 anni; in giallo il limite di affioramento delle Sabbie e Ghiaie di Messina.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

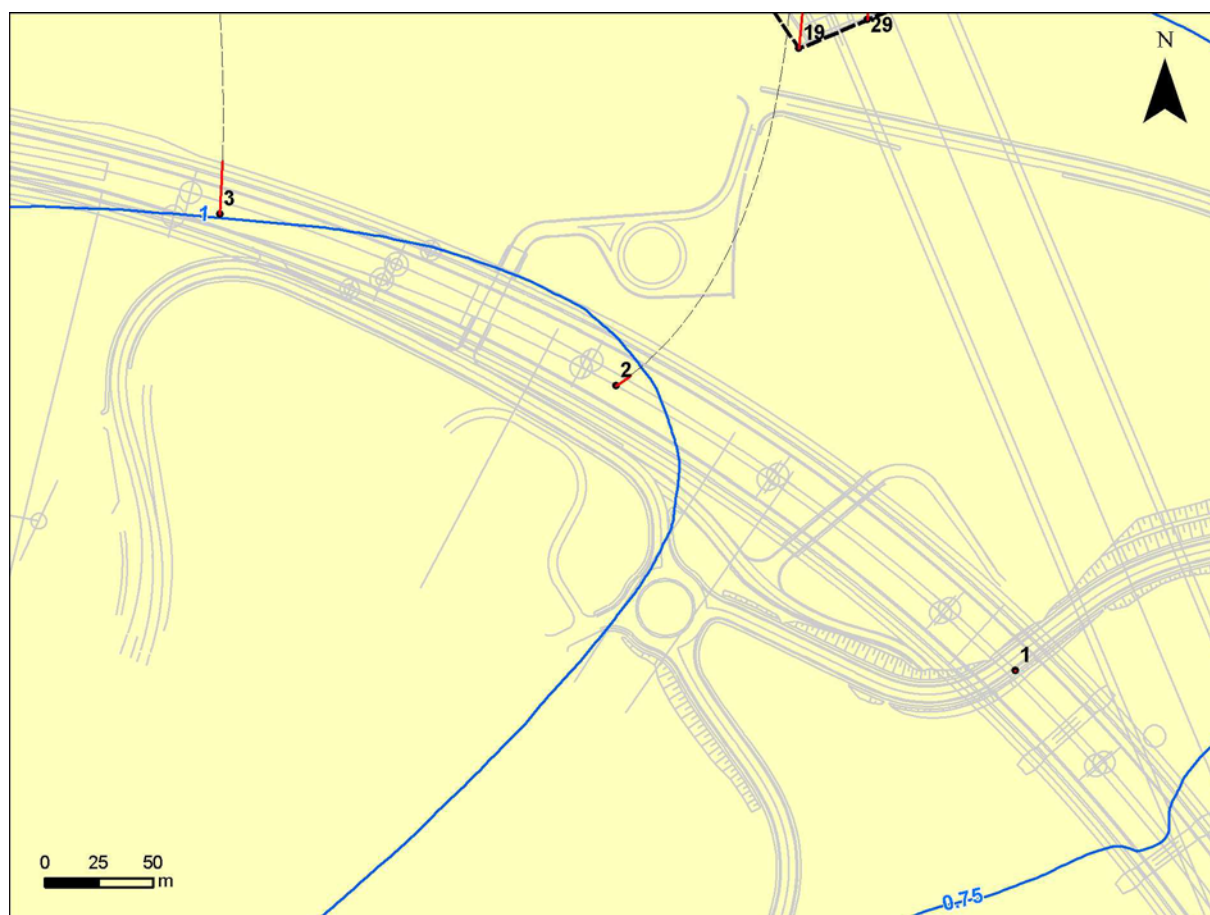


Figura 51. Ubicazione dei punti di simulazione della propagazione in falda per il Viadotto Pantano per la condizione in corso d'opera; in rosso i percorsi entro i 10 anni ed in nero i percorsi oltre i 10 anni; in giallo il limite di affioramento delle Sabbie e Ghiaie di Messina.

5.2 Area di cantiere dell'opera di ancoraggio

Questa simulazione considera l'eventuale sversamento di contaminanti in falda in corrispondenza dell'area di cantiere dell'opera di ancoraggio. I percorsi di migrazione sono calcolati a partire da 13 punti di potenziale immissione uniformemente distribuiti sull'areale interessato dall'opera sia in condizioni ante-operam sia in corso d'opera durante la realizzazione delle torri di fondazione del ponte (Figura 52 e Figura 53).

In condizioni ante-operam le particelle di contaminante in 10 anni coprono distanze comprese tra 65.8 e 0.04 m, rimanendo entro l'areale di affioramento delle Sabbie e ghiaie di Messina. Le velocità di transito risultano comprese tra 6.6 e 0.004 m/anno (Tabella 12).

Il drenaggio necessario alla realizzazione delle opere di fondazione delle torri comporta un arretramento dell'isopieza 1 m s.l.m. ed una diminuzione del gradiente piezometrico dalla zona

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

dell'ancoraggio verso mare. Questo si traduce in una diminuzione complessiva delle distanze di transito rispetto alla condizione ante-operam con l'eccezione dei punti 21, 26, 27 e 32 (Figura 52 e Figura 53). La distanza di migrazione a 10 anni è compresa tra 55.9 e 0.03 m a cui corrispondono velocità di transito tra 5.6 e 0.003 m/anno (Tabella 12).

Anche per quanto concerne le aree di cantiere connesse alla realizzazione dell'opera di ancoraggio non si evidenziano particolari criticità legate ad eventuali fenomeni di contaminazione della falda. Sulla base delle simulazioni eseguite solo il pozzo 73, molto prossimo alla zona di ubicazione dell'opera, potrebbe trovarsi sulla traiettoria in falda di sostanze disperdenti dalla zona dell'opera, se si ammette una certa zona di disturbo per la cantierizzazione nel suo intorno. I tempi di arrivo sarebbero comunque nell'ordine di alcuni anni.

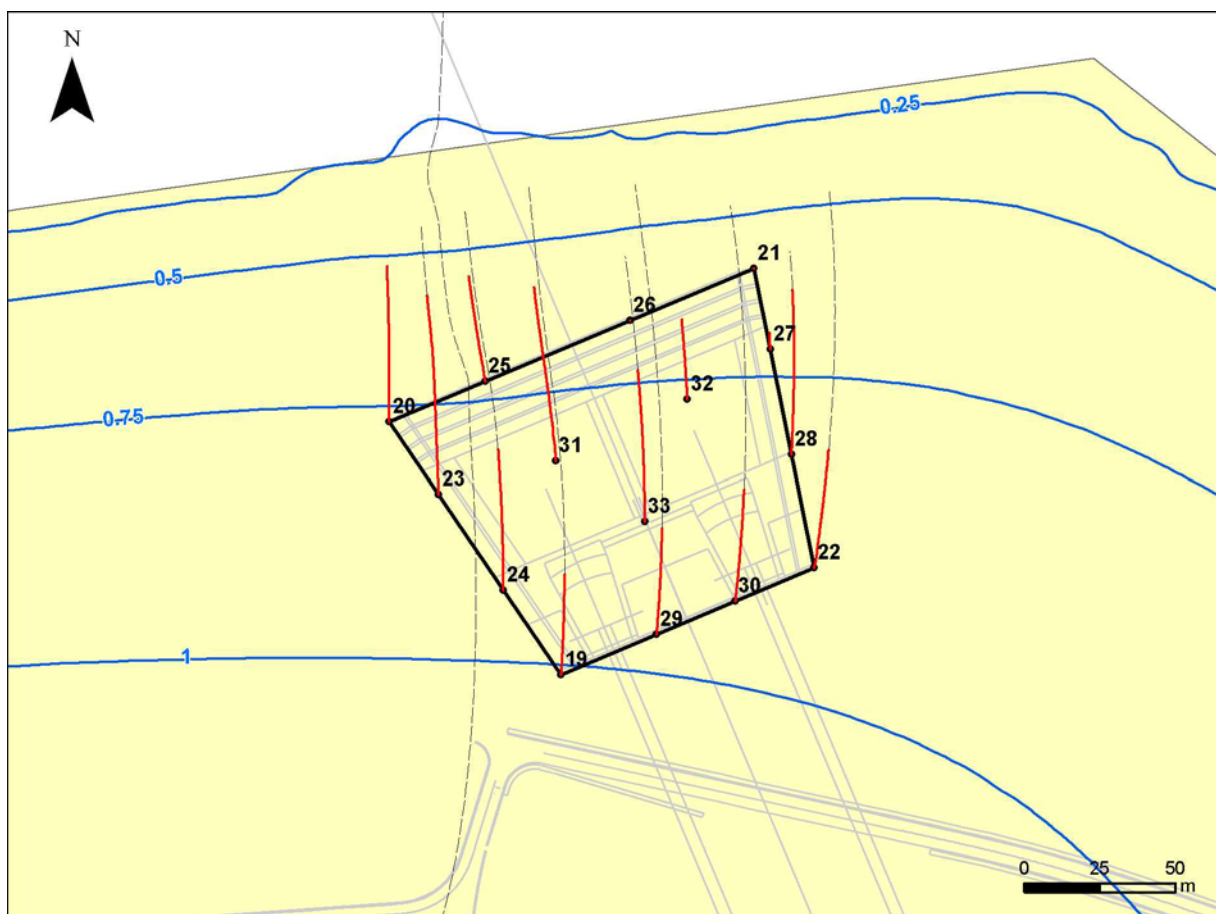


Figura 52 - Ubicazione dei punti di simulazione della propagazione in falda per l'opera di ancoraggio simulati per la condizione ante-operam; in rosso i percorsi entro i 10 anni ed in nero i percorsi oltre i 10 anni; in giallo il limite di affioramento delle Sabbie e ghiaie di Messina.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

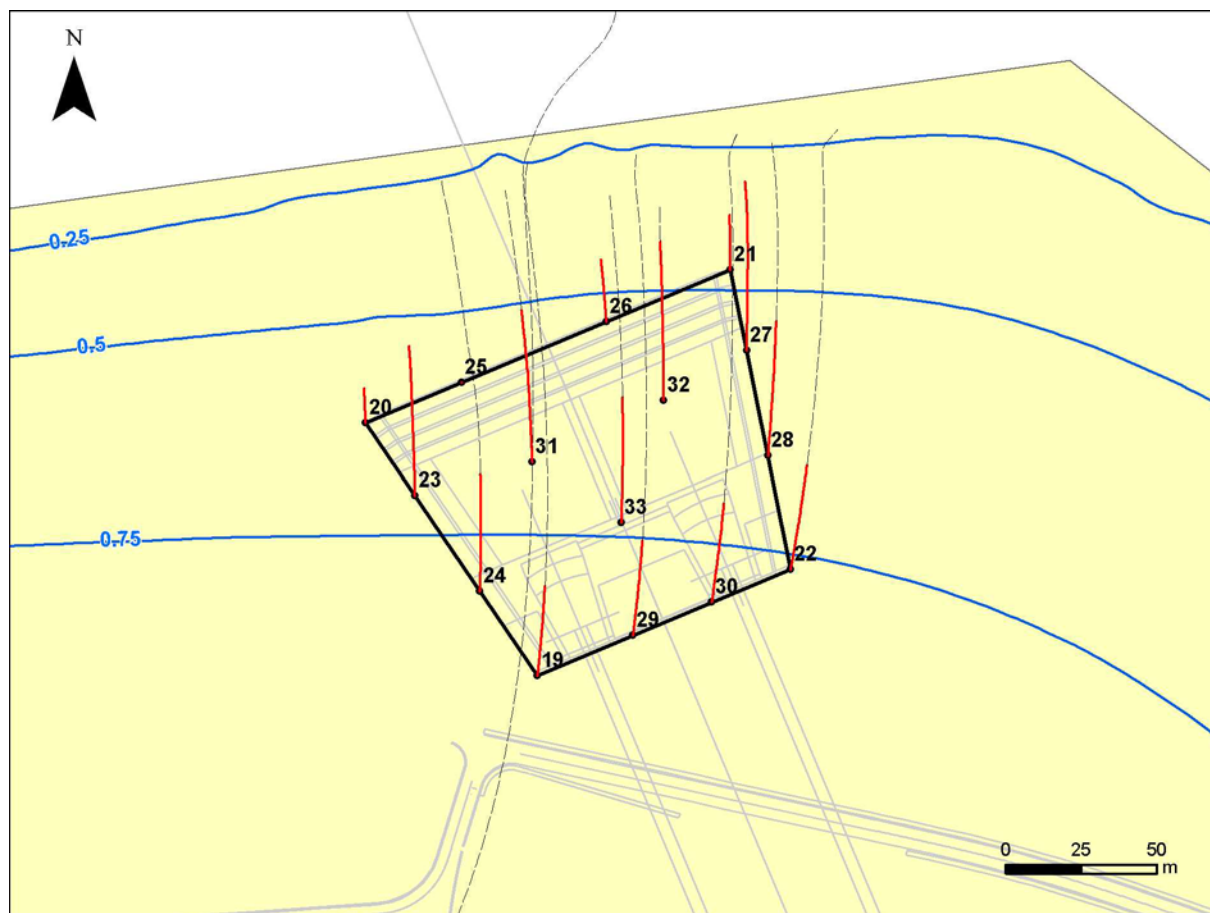


Figura 53 - Ubicazione dei punti di simulazione della propagazione in falda per l'opera di ancoraggio simulati per la condizione in corso d'opera; in rosso i percorsi entro i 10 anni ed in nero i percorsi oltre i 10 anni; in giallo il limite di affioramento delle Sabbie e ghiaie di Messina.

5.3 Gallerie ferroviarie e stradali

Questa simulazione prevede di valutare i percorsi di migrazione in falda di eventuali sostanze immesse a partire dalle gallerie stradali e ferroviarie. I percorsi di migrazione sono stati calcolati a partire rispettivamente da 9 punti di potenziale contaminazione ubicati lungo il tracciato delle gallerie ferroviarie e 6 punti di potenziale contaminazione ubicati lungo il tracciato delle gallerie stradali, sia in condizioni ante-operam, sia in corso d'opera durante la realizzazione delle torri di fondazione del ponte (Figura 54 e Figura 55).

In condizioni ante-operam le particelle immesse in falda coprono distanze comprese tra 51.0 e 4.4 m in 10 anni per le gallerie ferroviarie e distanze comprese tra 43.9 e 21.9 m per quelle stradali (Tabella 12). In tutti i casi l'ipotetica contaminazione rimane entro l'areale di affioramento delle sabbie e ghiaie di Messina. Le velocità che ne derivano sono comprese tra 5.16 e 0.4 m/anno nel

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

caso delle gallerie ferroviarie e tra 4.4 e 2.2 m/anno per quelle stradali (Tabella 12).

Durante la realizzazione delle torri di fondazione l'aumento del gradiente piezometrico induce una modesta variazione delle distanze di migrazione che risultano comprese tra 47.5 e 5.6 m in 10 anni per le gallerie ferroviarie e tra 41.5 e 26.0, per quelle stradali. Le velocità medie di migrazione a 10 anni risultano comprese tra 4.7 e 0.6 m/anno lungo il tracciato delle gallerie ferroviarie e tra 4.1 e 2.6 m/anno in prossimità delle gallerie stradali (Tabella 12).

I percorsi ed i tempi di migrazione calcolati non evidenziano particolari criticità connesse alla realizzazione delle gallerie ferroviarie e stradali. Le uniche opere di captazione localizzate in zona potenzialmente più sensibile sono quelle molto vicine alle opere, ossia i pozzi 29, 66, 71, 90 e 91. In ogni caso, poichè le velocità di flusso non tengono mai conto della presenza della zona insatura, sarebbero comunque necessari alcuni anni affinché queste opere venissero coinvolte da migrazione di sostanze a partire dalla zona della galleria.

Le basse velocità di migrazione annullano le possibilità di contaminazione del Pantano Grande ubicato a valle idrogeologico rispetto allo sviluppo delle gallerie. Nel caso peggiore, infatti, un potenziale contaminante impiegherebbe oltre 750 anni per raggiungere il lago costiero (particella n 12 in Figura 54 e Figura 55). Considerazioni del tutto analoghe valgono per il Pantano Piccolo.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

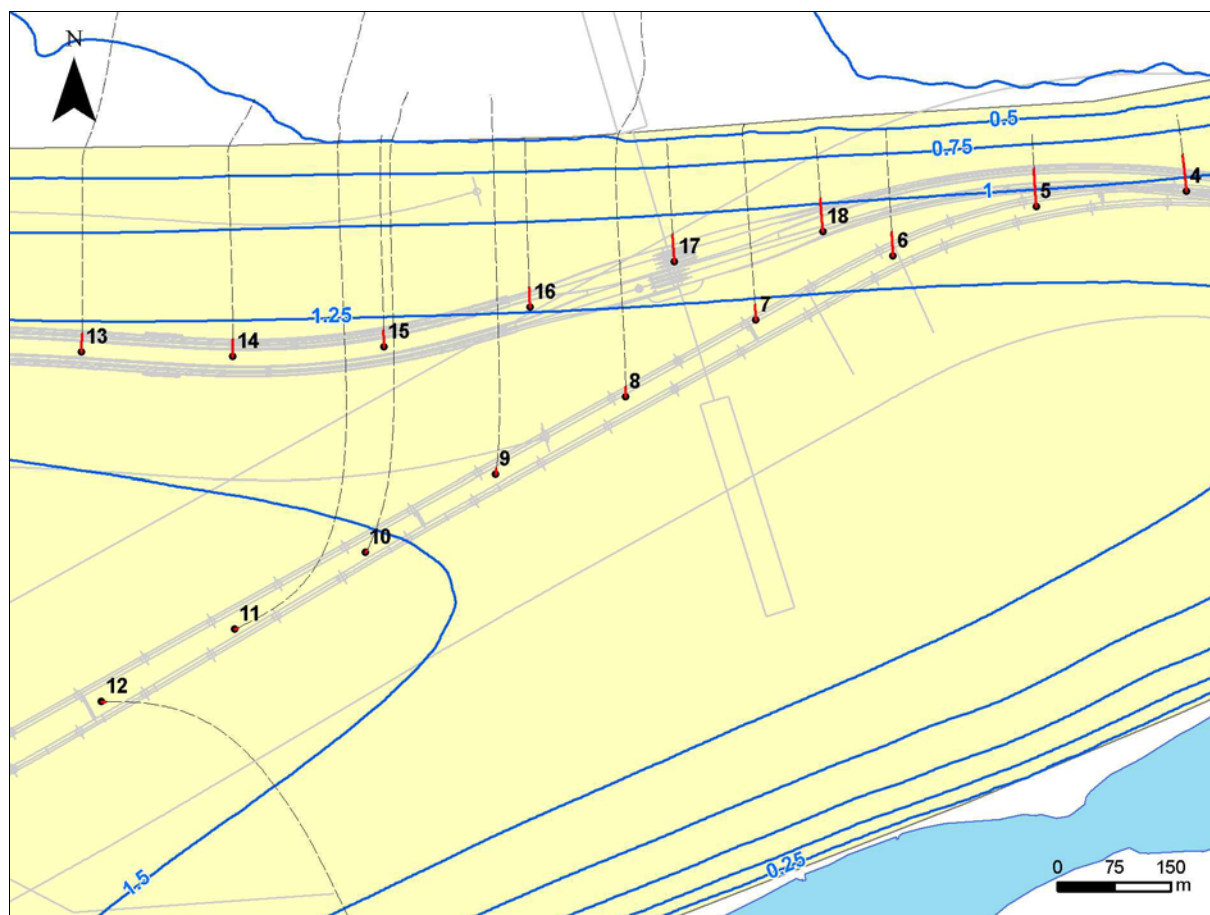


Figura 54 - Ubicazione dei punti di simulazione della propagazione in falda lungo i tracciati delle gallerie stradali e ferroviarie simulati per la condizione ante-operam; in rosso i percorsi entro i 10 anni ed in nero i percorsi oltre i 10 anni; in giallo il limite di affioramento delle Sabbie e ghiaie di Messina.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

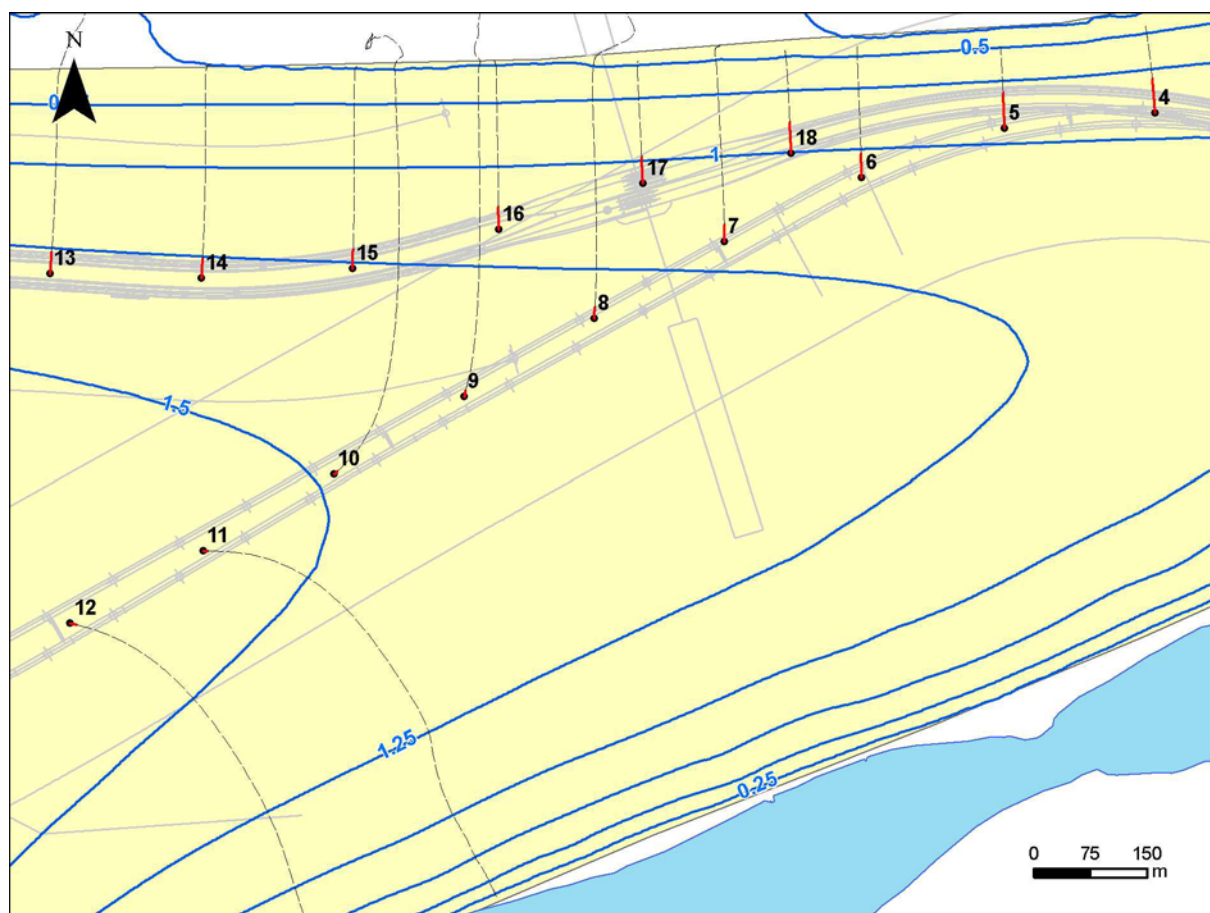


Figura 55 - Ubicazione dei punti di simulazione della propagazione in falda lungo i tracciati delle gallerie stradali e ferroviarie simulati per la condizione in corso d'opera; in rosso i percorsi entro i 10 anni ed in nero i percorsi oltre i 10 anni; in giallo il limite di affioramento delle Sabbie e ghiaie di Messina.

5.4 Area di cantiere nell'intorno delle fondazioni delle torri

Questa simulazione prevede di valutare i percorsi di migrazione in falda nell'area di cantiere delle fondazioni delle torri. I percorsi di migrazione sono stati calcolati a partire da 10 punti ubicati lungo il perimetro delle fondazioni ed all'interno delle stesse sia in condizioni ante-operam, sia in corso d'opera (Figura 56 e Figura 57).

Nel primo caso (ante-operam) a causa del basso gradiente piezometrico e della vicinanza della linea di costa le distanze di migrazione a 10 anni risultano comprese tra 0.1 e 0.01 m, da cui derivano velocità medie comprese tra 0.01 e 0.001 m/anno (Tabella 12).

In corso d'opera, a causa del drenaggio delle acque sotterranee, le distanze di migrazione a 10 anni aumentano essendo comprese tra 90.3 e 0.01 m a cui corrispondono velocità di trasferimento

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

comprese tra 9 e 0.001 m/anno circa (Tabella 12).

Anche nel caso delle opere di fondazione delle torri non si ravvisano particolari criticità legate ad eventuali episodi di contaminazione accidentale.

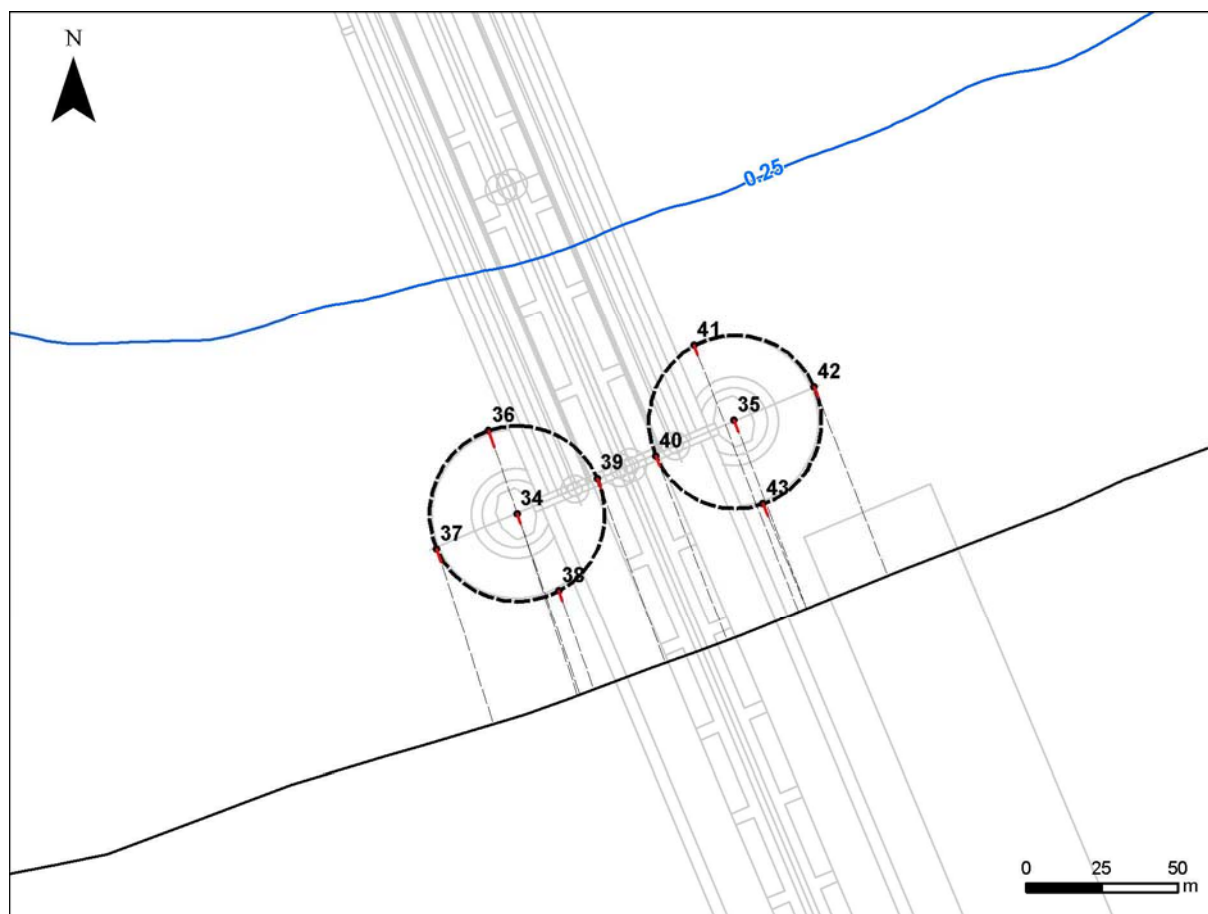


Figura 56 - Ubicazione dei punti di simulazione della propagazione in falda nei pressi delle opere di fondazione delle torri simulati per la condizione ante-operam; in rosso i percorsi entro i 10 anni ed in nero i percorsi oltre i 10 anni.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

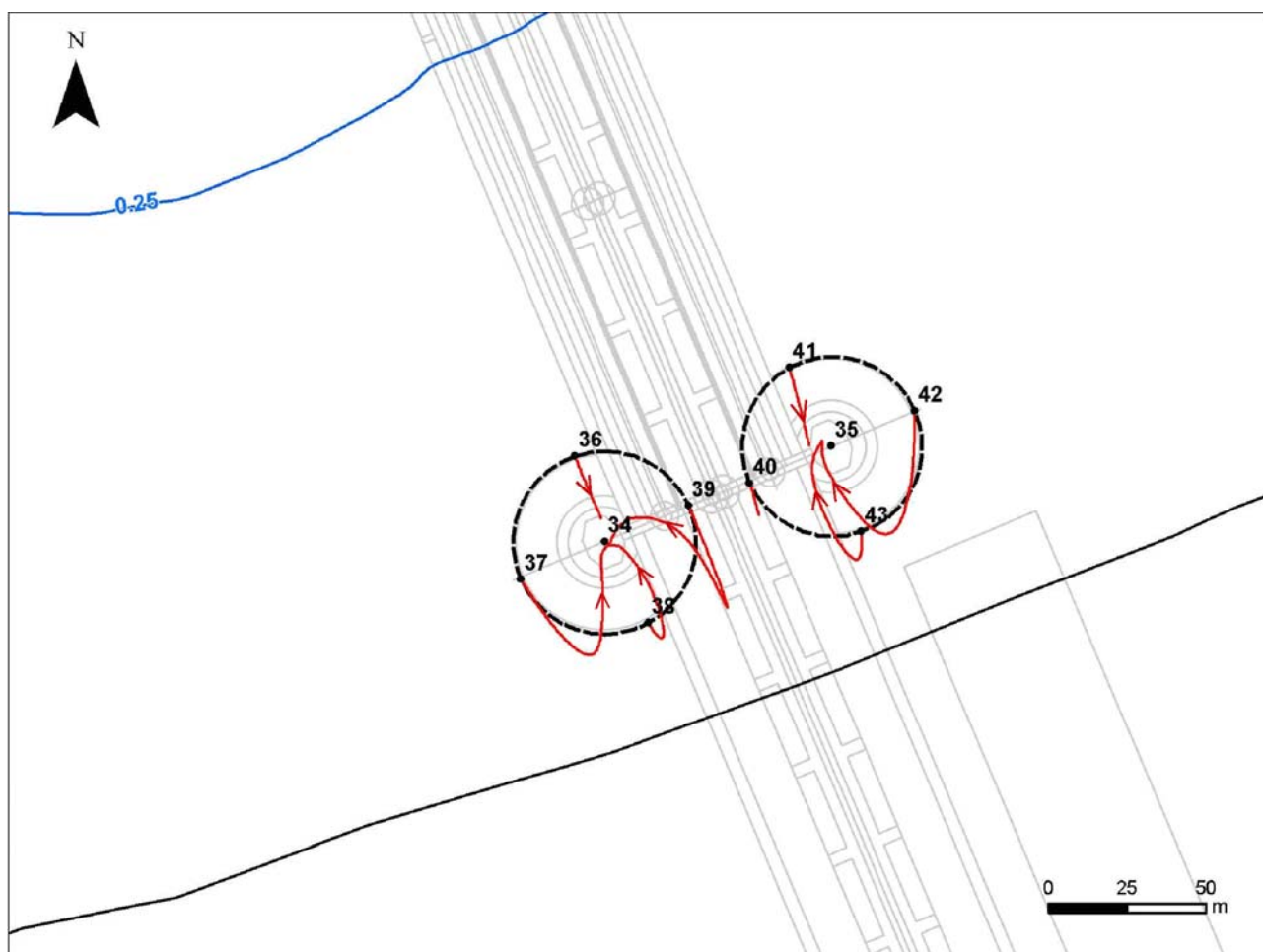


Figura 57 - Ubicazione dei punti di simulazione della propagazione in falda nei pressi delle opere di fondazione delle torri simulati per la condizione in corso d'opera; in rosso i percorsi delle particelle; in figura è stata indicata la traiettoria di una sola delle particelle sul perimetro degli scavi. Le altre traiettorie sono analoghe.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

6 Conclusioni

Lo studio eseguito ha permesso di chiarire numerosi aspetti inerenti la circolazione sotterranea nell'area dei Pantani che verrà interessata dalla realizzazione di numerose opere, tra cui i principali sono:

1. I rapporti tra gli specchi d'acqua e la falda.
2. L'influenza delle opere sul contesto idrogeologico e sugli specchi d'acqua.
3. L'influenza delle opere sull'ingressione del cuneo salino
4. I possibili percorsi di deflusso in falda e gli eventuali rischi di inquinamento e alterazione dello stato chimico della falda.

Nei successivi paragrafi viene presentata una sintesi per ognuno dei suddetti aspetti

6.1 Rapporti tra Pantani e falda

I Pantani sono specchi di acqua salmastra con salinità leggermente inferiore a quella del mare, con il quale sono costantemente in comunicazione attraverso almeno tre canali, cui se ne aggiunge un quarto in periodo primaverile-autunnale (chiuso in periodo invernale).

Sulla base della calibrazione eseguita con modello numerico emerge che i laghi ricevono acqua dalla falda, seppur in piccole quantità, stimate in 365.000 m³/anno per il Pantano di Ganzirri e in 170.000 m³/anno per il Pantano di Faro. Pur con i margini di errore che sempre risiedono nei risultati di una modellizzazione numerica, in cui le variabili di difficile controllo sono sempre molto numerose, si ritiene che questi volumi siano sicuramente realistici almeno a livello di ordini di grandezza degli afflussi agli specchi d'acqua.

Se questi volumi vengono confrontati con quelli immagazzinati nei laghi, pari a circa 975.000 m³ per il lago di Ganzirri e a 2.500.000 litri per il lago di Faro si ha effettiva conferma del fatto che si tratta di quantità piuttosto modeste.

Sulla base delle stime fatte si è altresì concluso che il fenomeno evaporativo è probabilmente sufficiente da solo a garantire lo smaltimento degli apporti da falda calcolati con il modello, senza che si debba instaurare un flusso perenne di acque verso il mare, cosa che sarebbe infatti in contraddizione con lo stato reale delle cose, per il quale, sulla base delle informazioni raccolte in sito, sembra sussistere un flusso prevalente da mare e, solo saltuariamente, un flusso verso mare. Il modello realizzato mostra anche come una minima parte dell'acqua immagazzinata nei laghi

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

venga ceduta alla falda sul lato mare, e ciò contribuisce ad incrementare il contenuto salino della medesima nell'immediato intorno degli specchi d'acqua. Tali perdite sono comunque minime e di due ordini di grandezza inferiori rispetto agli apporti della falda ai Pantani sul lato di monte.

6.2 Influenza delle opere sulla falda e sugli specchi d'acqua

Tra le opere da realizzare nella zona dei Pantani quelle che potranno interagire con la zona satura presente nell'acquifero costiero sono le fondazioni delle torri del ponte e le fondazioni del viadotto Pantano. Tutte le altre opere (ancoraggio, gallerie ecc.) interesseranno la zona insatura e avranno influenza irrilevante nei confronti del deflusso in falda.

Per quanto attiene allo scavo dei pozzi di fondazione delle torri, sono stati presi in conto attraverso la modellazione numerica tre diversi scenari di permeabilità del tappo di fondo. In ognuno dei tre scenari è stata ovviamente anche considerata la presenza dei diaframmi impermeabili che verranno realizzati sul perimetro, da realizzare fino alla profondità di -38.5m prima dell'approfondimento dello scavo a -15m al loro interno.

In uno scenario che può essere considerato quello di norma atteso, a valle del trattamento del terreno con jet-grouting sul tappo di fondo, si attende che il terreno presenti una conducibilità idraulica dell'ordine dei 10^{-7} m/s. In ogni caso questa condizione sarà quella cui si tenderà in fase realizzativa, eventualmente anche attraverso riprese del trattamento qualora vi fossero filtrazioni di entità superiore al previsto. Per permeabilità di quest'ordine di grandezza si prevede l'emungimento di portate dell'ordine dei 4 l/s complessivi da entrambi i pozzi di fondazione.

Cautelativamente è stata presa in considerazione anche un'ipotesi più conservativa sviluppata al fine di comprendere quale sarebbe l'emungimento che si otterrebbe per permeabilità superiori del tappo di fondo (da intendersi quale scenario di rischio). Con conducibilità idrauliche del tappo di fondo dell'ordine dei 10^{-6} m/s si otterrebbero portate dell'ordine dei 12 l/s. Assumendo invece permeabilità decisamente inferiori e però oggettivamente molto difficili da ottenere, dell'ordine dei 10^{-8} l/s, il tappo di fondo diverrebbe praticamente impermeabile e il drenaggio si limiterebbe a portate dell'ordine di 1 l/s.

A partire da queste portate si sono valutati gli effetti che il drenaggio potrebbe avere sulla falda e indirettamente sui Pantani.

Sempre facendo riferimento allo scenario che, da progetto, è quello da considerarsi di norma atteso, quindi con tappo di fondo a conducibilità 10^{-7} m/s e portate emunte dell'ordine dei 4 l/s, gli afflussi dalla falda verso i Pantani diminuirebbero di un quantitativo molto modesto dell'ordine del 6% per il Pantano Grande e del 9% per il Pantano Piccolo. Un quantitativo di acqua di falda non

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

molto differente rispetto a quello originario continuerebbe quindi a defluire verso i Pantani.

Nel caso dell'ipotesi più conservativa, con tappo di fondo a conducibilità 10^{-6} m/s e portate emunte dell'ordine dei 12 l/s, ovviamente si avrebbero variazioni analoghe o di poco più accentuate, ma comunque molto esigue, dell'ordine del 6% per il Pantano Grande e del 13% per il Pantano Piccolo.

Alla luce di questi dati si può ribadire quanto già discusso descrivendo gli esiti delle analisi numeriche condotte, ossia che emerge con chiarezza che **per le condizioni attese da progetto nella realizzazione del tappo di fondo, le influenze sul regime idrogeologico dei Pantani sono praticamente irrilevanti**. Variazioni di deflusso dell'ordine di quelle calcolate per questo tipo di situazione rientrano ampiamente in quelle che verosimilmente sono le normali oscillazioni stagionali del regime di deflusso in falda. In ogni caso anche assumendo un'ipotesi più pessimistica di tappo di fondo, con tenuta meno pervasiva, le variazioni indotte sui Pantani sono relativamente basse, soprattutto quando si consideri che i laghi sono sempre e comunque collegati al mare e che: i) le variazioni di deflusso in falda possono essere compensate da minimi incrementi di scambi di acque con il mare medesimo senza grossi sconvolgimenti del regime idrologico degli specchi d'acqua; ii) gli impatti legati agli emungimenti in falda (cfr. § 3.5.1) sono già attualmente di ordine assai maggiore di quanto non sarà comunque l'effetto di emungimento dalle fondazioni (peraltro solo temporaneo); iii) in caso di tenuta non perfetta del tappo di fondo si potrà comunque procedere in corso d'opera ad integrazioni del jet-grouting con incremento della tenuta medesima. Da ultimo va ricordato che, come si evince dai modelli numerici realizzati, una volta completate, le fondazioni delle torri non costituiranno un ostacolo di particolare rilievo per il deflusso dell'acqua di falda a mare. L'elevata trasmissività dei terreni circostanti consentirà di annullare entro pochi metri l'effetto barriera prodotto dalle fondazioni.

Per quanto attiene agli effetti indotti sul deflusso in falda dalle fondazioni del viadotto Pantano, le simulazioni eseguite hanno mostrato che queste strutture non avranno effetti significativi. Ciò è dovuto soprattutto al fatto che esse si inseriscono in un acquifero con elevata conducibilità idraulica (depositi alluvionali), nonché al fatto che la zona di trattamento con jet-grouting non raggiungerà la base dei depositi alluvionali, pertanto l'effetto diga risulterà ampiamente mitigato.

Per quanto attiene ai possibili impatti transitori, in fase di realizzazione delle fondazioni, a carico dei pozzi presenti nella zona, non vi sono da rilevare problematiche significative. Tutti i pozzi si trovano praticamente fuori dal raggio di influenza dell'emungimento durante la fase di approfondimento delle fondazioni oppure in settori dove l'abbassamento della superficie piezometrica sarà inferiore al decimetro e quindi non rilevante nonostante i ridotti livelli d'acqua nei

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

pozzi di questa regione. Solo i pozzi 32, 67, 68, 65 e 66 potrebbero al limite subire modeste diminuzioni della resa in relazione ai possibili abbassamenti di falda di ordine sub-decimetrico di cui sopra. Per meglio definire i possibili impatti delle opere su questi pozzi si può fare riferimento alla classificazione dei livelli di impatto a quattro classi già utilizzata per gli studi sulle gallerie in territorio calabrese e sulla restante parte del territorio siciliano:

1. Impatti elevati
2. Impatti medi
3. Impatti bassi
4. Impatti nulli

Nella classe 1 ricadono tutte le opere di captazione passibili di disseccamento totale; nella classe 2 ricadono le opere che possono subire un abbassamento marcato del livello d'acqua statico e un calo di produttività piuttosto consistente; nella classe 3 ricadono le opere che non subiranno un abbassamento evidente del livello d'acqua statico ma che potranno subire una riduzione della produttività; nella classe 4 ricadono tutte le opere di captazione che non subiranno impatti significativi.

Tutti i pozzi citati in precedenza (32, 67, 68, 65 e 66) possono essere inclusi nella classe di rischio 3. Una volta verificato un eventuale e significativa riduzione della produttività, potranno essere realizzati dei pozzi integrativi a compensazione delle portate mancanti.

6.3 Influenza delle opere sull'ingressione del cuneo salino

Nell'area dei Pantani la falda dell'acquifero costiero presenta un elevato contenuto salino sin da livelli molto superficiali. In una fascia di larghezza di 200-300m dalla linea di costa è presente un sottile livello di acque dolci (1-5m) che galleggiano su acque salmastre, rapidamente passanti verso il basso ad acque salate con salinità prossime o pari a quella dell'acqua di mare. Al di sotto della dorsale spartiacque tra le due coste le acque della falda, pur avendo un'elevata concentrazione ionica possono essere principalmente considerate acque dolci (peraltro utilizzate talora a scopo idropotabile) e l'interfaccia con le acque salmastre si trova a profondità maggiori che non sulla linea di costa.

Il modello numerico realizzato indica che il pompaggio dai pozzi di fondazione sia con tappo di fondo a conducibilità idraulica 10^{-7} m/s che a conducibilità 10^{-6} m/s non determinerà alcun effetto significativo sulla distribuzione della salinità su grande scala. Solo in prossimità della costa interverranno modeste variazioni delle interfacce di isosalinità in un settore peraltro molto prossimo ai pozzi di fondazione.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

La salinità nell'intorno dei Pantani non subirà variazioni di rilievo e altrettanto si può affermare per il settore della dorsale spartiacque tra le due coste ove si colloca la maggior parte dei pozzi ad uso potabile ed irriguo.

6.4 Dispersione eventuale di inquinanti e variazioni del chimismo di falda

Le simulazioni di tracciamento in falda eseguite mediante modello numerico hanno dimostrato che in tutto l'areale dei Pantani le velocità di deflusso sono estremamente basse, dell'ordine di pochi metri all'anno (massimo una decina di metri). Si consideri che le simulazioni eseguite sono ampiamente conservative, poiché non tengono in conto della presenza della zona insatura, ove la maggior parte delle opere si inseriscono, che con il suo potenziale di mitigazione, attraverso fenomeni di adsorbimento e dispersione, contribuirebbe a ritardare considerevolmente e ridurre la propagazione degli inquinanti.

Fatte le precedenti considerazioni emerge che qualsiasi sostanza immessa a partire dalle opere impiegherebbe generalmente da una a più decine di anni per raggiungere qualsiasi opera di captazione presente nella zona. L'unica eccezione a questa regola generale è rappresentata dai pozzi 29, 66, 71, 90, 91, che comunque verrebbero eventualmente raggiunti solo per tempi dell'ordine di alcuni anni.

Per quanto attiene più specificatamente alle possibili alterazioni del chimismo di falda connesse con l'uso di cementi e bentonite, che costituiscono quantitativamente i principali elementi estranei che entreranno in contatto con le acque di falda si può concludere innanzitutto che la bentonite non costituisce un elemento di rischio rilevante ai fini dell'alterazione chimica delle acque. Essa potrebbe originare modesti fenomeni di adsorbimento cationico (es di Na⁺) che però, oltre a non inficiare significativamente l'utilizzabilità delle acque di falda avranno anche valenza temporanea e circoscritta all'intorno delle opere. Per quanto attiene all'utilizzo del calcestruzzo, la problematica più rilevante dal punto di vista geochimico riguarda la produzione di acque alcaline oppure l'incremento di silice disciolta nel caso di utilizzo di silicato di sodio. In entrambi i casi si tratta comunque di fenomeni transitori, legati alla fase di maturazione e circoscritti alla zona degli interventi. La riduzione repentina del pH potrebbe condurre a precipitazione di specie disciolte, prevalentemente carbonati, che tenderebbero a far diminuire, a livello locale la trasmissività dell'acquifero, con possibili modesti peggioramenti della condizione di deflusso a valle delle opere. Appaiono tuttavia sostanzialmente esenti da queste problematiche tutte le gallerie e l'opera di ancoraggio perché le variazioni di chimismo sarebbero circoscritte all'acqua vadosa e non influiscono significativamente sull'acqua di falda.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Diverso è il discorso per le opere che entrano in contatto diretto con la falda senza drenarla (ad esempio le opere di fondazione, nella fase di esecuzione dei diaframmi e del tappo di fondo). In questo caso l'interazione acqua/cemento potrebbe produrre un pennacchio di alterazione del pH nell'acqua di falda che si trova in migrazione molto lenta verso la linea di costa. Tuttavia, dalle simulazioni di trasferimento in falda eseguite emerge che l'acqua di falda in prossimità della costa è praticamente immobile (velocità dell'ordine dei 5-10 cm/anno). Le perturbazioni avrebbero quindi carattere estremamente circoscritto al più a qualche metro o decina di metri nell'intorno del tappo di fondo quando si consideri che questo verrà realizzato immettendo miscele cementizie in pressione che, generando un gradiente locale in falda, potrebbero propagarsi per tratti molto limitati. In questo intorno di dimensioni poco significative si potranno verificare fenomeni di precipitazione di fasi carbonatiche implicanti una riduzione estremamente locale della trasmissività. Nel caso di utilizzo di silicato di sodio o altri additivi si potranno anche generare locali incrementi di sostanze disciolte (es. silice), anche questi di entità molto circoscritta e comunque tendenti a propagarsi verso mare. Generalmente cemento e bentonite sono sostanze che non provocano inquinamento e che sono comunemente impiegate anche nello scavo di pozzi ad uso idropotabile (Civita 2005). I gel silicatici (e.g. miscele con silicato di sodio) che sono comunemente impiegati nell'ambito delle operazioni di consolidamento, sono comunemente considerate come delle sostanze che non inducono inquinamenti rilevanti, e i cui effetti in falda tendono a ridursi molto rapidamente nello spazio e nel tempo (Gouvenot, 1985; Mongilardi & De Paoli, 1991; Kutzner, 1996).

Per contro nella fase di scavo dei pozzi di fondazione, essendo il flusso diretto verso i pozzi medesimi, non sussistono problemi di alterazione del chimismo in falda.

Di seguito si riportano alcuni riferimenti bibliografici in merito a questa specifica tematica:

- Civita, M. (2005). Idrogeologia applicata e ambientale. Casa Editrice Ambrosiana, 794 pp.
- Gouvenot, D. (1985). Les injections dans les sol et l'environnement. Proc. IX ECSMFE, 3, 1245-1252.
- Mongilardi, E., De Paoli, B. (1991). Le miscele d'iniezione silicatica ed il rispetto delle acque di falda. Atti conv. "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo", Milano, 279-288.
- Kutzner, Ch. (1996). Grouting of rock and soil. Balkema, Rotterdam, 271pp.

6.5 Sistemi di monitoraggio

Come previsto dalle specifiche tecniche per approntamento degli studi di settore per l'area dei

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA		<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Pantani (documento GCG.F.07.02) e per la progettazione ambientale delle opere (GCG.F.07.05), è stato predisposto un sistema di monitoraggio piezometrico al contorno dei Pantani, presentato e descritto nella relativa componente di progetto.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IDROGEOLOGICA DESCRITTIVA	<i>Codice documento</i> AS0078_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

7 Bibliografia

- Anderson M.P., Woessner W.W. (1991) - Applied groundwater modeling - Simulation of flow and advective transport. *San Diego, Calif., Academic Press, 381 p.*
- Arch J. & Maltman, A. (1990). Anisotropic permeability and tortuosity in deformed wet sediments. *Jour. Geoph. Res., 95, 9035-9045.*
- Barlow P. M. (2003) - Ground Water in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast. *USGS Circular 1262, Virginia 2003.*
- Dausman, A.M., Langevin, C.D. (2002). Representing hydrodynamic dispersion in saltwater intrusion models of different temporal scales: American Water Resources Association. Spring Specialty Conference: Coastal Water Resources, extended abstract.
- Del Frate A., Lombardo E., Monti G., Nosari N., Pastore V. Modelling of Surface and Ground Water Interaction for Remediation Design at Torviscosa Site. Provincia di Milano, Convegno Internazionale e Progetto TRANS-IT: La bonifica dei siti contaminati: normative e tecnologie a confronto, Milano, 23, 24 novembre 2006
- Diersch H.-J. G.(2006) – Feflow 5.3 User's Manual. Wasy GmbH Berlin, 2006.
- Fetter C. W. (1994) – Applied hydrogeology. Second Edition. *Prentice Hall, New York (USA), 592 pp.*
- Ghyben W. B. (1888) – Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam. *Tijdschrift van Let Koninklijk Inst. Van. Ing..*
- La Licata, I., Langevin, C.D., Dausman, A.M. (2007). Effect of tidal fluctuations on contaminant transfer to the ocean, in Sanford, W., Langevin, C.D., Polemio, M., and Povinac. P., eds., 2007, A new focus on groundwater-seawater interactions: IAHS Publication 312, Oxfordshire, United Kingdom, p. 334-341.
- Herzberg A. (1901) – Die Wasserversorgung einiger nordseebader. *J.Gasbeleuchth, Wasserversorg., 44, 815-819.*
- Hilli M.C. (2003) The practical use of simplicity in developing ground water models. *Ground Water 44 (6): 775-781.*
- Knipe, R.J. (1992) – Faulting Processes and fault seal. In *Larsen, R.M., Brekke, H., Larsen, B.T., Telleraas, E., Ed. «Structural and tectonic modelling and its application to petroleum geology», NPF Spec. Pub. (1) 325-342.*
- Visentini, M. (1937) - L'evapotraspirazione dagli specchi liquidi. *Memorie e Studi Idrografici. Pubbl. N.2 del Servizio Idrografico, Ist. Poligrafico dello Stato, 9, Roma.*